



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OBRÁBĚNÍ INCONELU 718 PRO APLIKACE V LETECKÉM
PRŮMYSLU**

INCONEL 718 MACHINING FOR AEROSPACE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Urbánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Vojtěch Urbánek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Obrábění inconelu 718 pro aplikace v leteckém průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato závěrečná práce je zaměřena na řešení problematiky výroby součástky, která je konstruována z těžkoobrobitelného materiálu Inconel 718. Součástka je využívána v leteckém průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

- shrnutí zkušeností s obráběním Inconelu 718,
- návrh experimentálního měření silového zatížení při frézování,
- obrábění experimentálních vzorků,
- statistické zpracování naměřených datových souborů a shrnutí dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

GRZESIK, W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

GUPTA. K. (ed.). Advanced manufacturing technologies. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.

MOURITZ. P. A. Introduction to aerospace materials. Oxford u.a: Woodhead Publ. Limited, 2012. ISBN 978-085-7095-152.

DAVIM, J. P. (ed.). Traditional machining processes. 1. New York: Springer, 2014. ISBN 978-36-2450-871.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na zkoumání vlastností, využití a problematiku frézování Inconelu 718 pro aplikace v leteckém průmyslu. V teoretické části této práce byla provedena studie superslitin a požadavků na jejich vlastnosti pro uplatnění v letadlových motorech. Dále jsou zde popsány třídy obrobitelnosti, řezné materiály a samotný proces frézování se shrnutím poznatků o frézování Inconelu 718. Experimentální část se zabývá měřením a vyhodnocením silového zatížení při frézování Inconelu 718 nástroji ze slinutého karbidu a řezné keramiky.

Klíčová slova

obrobitelnost, Inconel 718, frézování, řezná keramika, slinutý karbid, řezné síly

ABSTRACT

Bachelor thesis is aimed at exploring the properties, usage and issues with milling of the Inconel 718 for aerospace applications. In the theoretical part a study of superalloys and their properties for successful application in aircraft engines was conducted. Further the machinability classes, cutting materials and process of milling focusing on milling of the Inconel 718 are described. The experimental part deals with measuring and evaluation of cutting forces when milling the Inconel 718 with cemented carbide and ceramic cutting tools.

Key words

machinability, Inconel 718, milling, ceramic cutting tool, cemented carbide, cutting forces

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URBÁNEK, V. *Obrábění Inconelu 718 pro aplikace v leteckém průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 66 s. 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění Inconelu 718 pro aplikace v leteckém průmyslu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 24.05.2019

Vojtěch Urbánek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce a panu Jiřímu Čechovi za pomoc během praktické části. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Česká zbrojovka a.s., CZ-AUTO za poskytnuté nástroje a materiál. V neposlední řadě děkuji mé rodině a blízkým za podporu během studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 SHRNUTÍ POZNATKŮ O INCONELU 718 A ZKUŠENOSTÍ S JEHO OBRÁBĚNÍM	10
1.1 Charakteristika a dělení superslitin.....	11
1.1.1 Základní strukturní fáze superslitin	12
1.1.2 Superslitiny na bázi niklu	13
1.1.3 Superslitiny na bázi kobaltu.....	13
1.1.4 Superslitiny na bázi železa a niklu.....	14
1.1.5 Tepelné zpracování superslitin	14
1.2 Popis a využití Inconelu 718.....	15
1.2.1 Tepelné zpracování Inconelu 718	16
1.2.2 Konkrétní využití Inconelu 718	16
1.3 Charakteristika obrobiteľnosti materiálů.....	18
1.4 Materiály řezných nástrojů	20
1.4.1 Slinutý karbid.....	20
1.4.2 Řezná keramika.....	23
1.4.3 Polykrystalický kubický nitrid boru	24
1.4.4 Mechanismy opotřebení břitů	25
1.5. Obrábění Inconelu 718.....	27
1.5.1 Kinematika a základní výpočtové vzorce pro parametry frézování	27
1.5.2 Problematika frézování Inconelu 718	30
1.5.3 Frézování Inconelu 718 nástroji ze slinutého karbidu	30
1.5.4 Frézování Inconelu 718 nástroji z řezné keramiky	33
1.5.5 Frézování Inconelu 718 nástroji z PCBN	35
2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ	36
2.1 Popis vybavení pro realizaci experimentu	36
2.1.1 Popis obráběcího stroje a měřicí aparatury	36
2.1.2 Popis řezných nástrojů	37
2.1.3 Popis testovacích vzorků obráběného materiálu.....	40
2.2 Stanovení parametrů experimentu	41

2.2.1	Průběh experimentu	41
2.2.2	Výpočet rezných podmínek	42
2.2.3	Analýza maximálního silového zatížení	43
2.2.4	Návrh měření silového zatížení při frézování Inconelu 718	45
3	REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ	47
3.1	Provedení experimentálního měření	47
3.2	Zpracování datových souborů z měření	48
4	DISKUZE	53
4.1	Návrhy pokračování řešení	54
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
	SEZNAM PŘÍLOH	61

ÚVOD

Materiály používané v leteckém průmyslu musí splňovat velké množství náročných požadavků, které se neustále stupňují. Jedná se například o dobré mechanické vlastnosti, které umožňují zvýšit trvanlivost jednotlivých součástí a tím také bezpečnost. Ovlivněním hmotnosti zase můžeme přispět ke snížení spotřeby paliva, což vede k ekologičtějšímu provozu. Některé součásti, zejména ty, které jsou užívány v motorech letadel, musí být odolné vůči vysokým provozním teplotám. Je zřejmé, že materiály v tomto průmyslu hrají klíčovou roli. Díky vývoji nových druhů, jakými jsou například superslitiny, lze lépe splnit výše uvedené požadavky.

Stupňování nároků nových materiálů na své vlastnosti přináší také vývoj v oblasti technologie výroby. Lepší mechanické vlastnosti či možné vyšší provozní teploty součástí z těchto materiálů jdou ruku v ruce se snížením schopnosti obrobit je. Konkrétně superslitiny a jejich zástupce na bázi niklu Inconel 718 patří k nejhůře obrobitelným materiálům vůbec, nicméně nabídka se vždy musí přizpůsobit poptávce, a proto byl v posledních letech zaznamenán velký pokrok v aplikacích netradičních řezných materiálů, nových technologií povlakování, chlazení a nových geometrií nástrojů.

Tato práce vznikla právě díky leteckému průmyslu, a to ve spolupráci se společností Česká zbrojovka a.s., CZ-AUTO, která se zabývá výrobou součástí a sestav do tohoto odvětví průmyslu. Na základě této spolupráce bude teoretická část o obrábění Inconelu 718 doplněna o reálný příklad z praxe – součást, která je montována do pohonné jednotky stroje na obrázku 1. V experimentální části pak bude měřeno a vyhodnocováno silové zatížení během frézování Inconelu 718 vybranými nástroji, přičemž bude sledován trend závislosti celkové zatěžující síly při měnící se řezné rychlosti.



Obr. 1 Letoun Cessna Denali společnosti Textron Aviation s motorem General Electric Catalyst [15].

1 SHRUTÍ POZNATKŮ O INCONELU 718 A ZKUŠENOSTÍ S JEHO OBRÁBĚNÍM

Inconel 718 patří do skupiny, která se nazývá superslitiny. Tato skupina obsahuje slitiny na bázi niklu, kobaltu, nebo také železa a niklu. Všechny materiály naleznou využití v pohonných jednotkách letadel především kvůli jejich pozoruhodným vlastnostem odolávat vysokým provozním teplotám. Součásti v proudových a raketových motorech musí fungovat ve velmi náročném a chemicky agresivním prostředí. Běžné materiály jednoduše nemůžou vydržet podmínky v místech, kde teplota dosahuje až 1300 °C. Kromě odolnosti vůči vysokým teplotám superslitiny disponují také vysokou pevností, houževnatostí, dlouhou životností a odolností vůči creepu. Jsou také odolné vůči korozi a oxidaci za vysokých teplot, což je řadí do skupin žáruvzdorných a žárupevných materiálů. Díky těmto vlastnostem jsou vhodné jako konstrukční materiály v moderních proudových motorech [1].

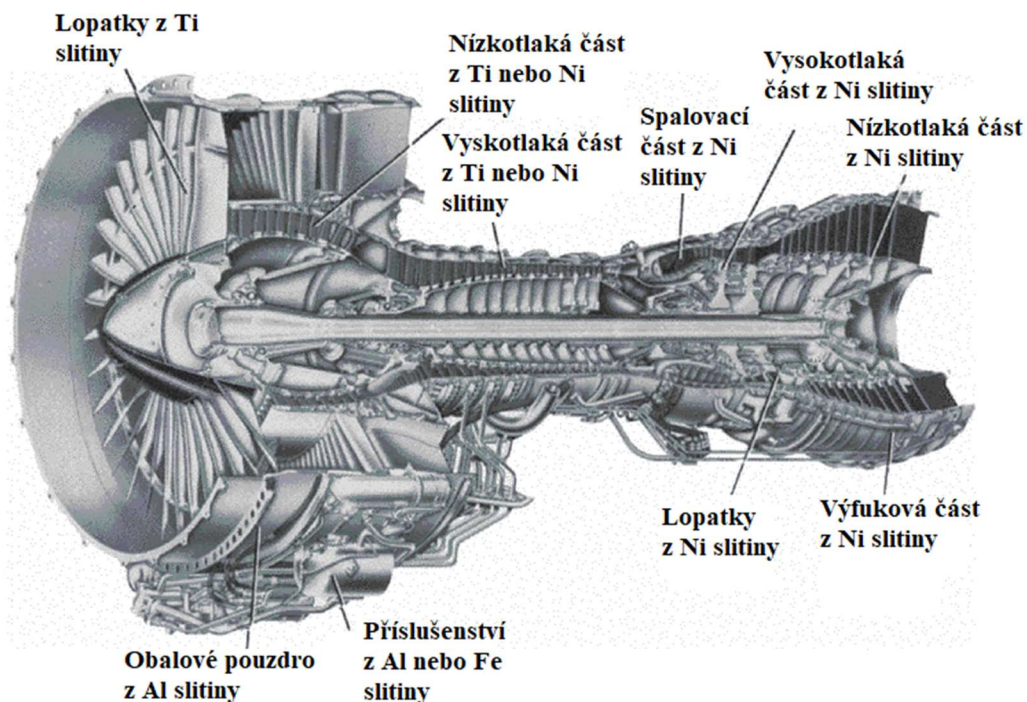
Superslitiny hrají klíčovou roli ve vývoji letadlových motorů již od roku 1950, kdy započala éra raketového a tryskového civilního letectví. Letoun se mohl bez superslitin v motoru pohybovat s nižší rychlostí a menším tahem. Nejefektivnější způsob, jak zvýšit tah motoru, se pojí se zvýšením jeho provozní teploty. To bylo velmi limitující z důvodu malé schopnosti tehdejších materiálů těmto teplotám odolávat. Během rozvoje letadlových motorů se zvýšila jejich maximální provozní teplota o 50 %. Výhod, které přineslo zvýšení provozních teplot v motorech, je vícero. Za posledních 20 let se tah proudových motorů zvedl o 60 %, zatímco spotřeba paliva klesla o 15 až 20 %. Pozoruhodných výsledků se dosáhlo pouze vylepšením materiálů ve vysokoteplotních sekcích motorů, zejména lopatek vysokotlakých turbín. Superslitiny jsou tedy nezbytnou částí v rozvoji tryskových motorů [1].

Konkrétní příklad extrémních podmínek můžou prezentovat lopatky turbín v proudových motorech, ty jsou navrženy pro zhruba 10 000 hodin v provozu, což představuje asi 8 milionů kilometrů letu za teploty okolo 1200 °C. Za této teploty se lopatky otáčejí rychlostí více než 10 000 min⁻¹, generující rychlost 1200 km.h⁻¹ na špičce a zatížení 180 MPa v kořenu lopatky [1].

Tedy pro funkci v extrémních podmínkách, které jsou při provozu součástí ve vysokoteplotních sekcích motoru, musí mít materiál následující vlastnosti [1]:

- vysokou mez kluzu a pevnost,
- lomovou houževnatost, tažnost,
- vysokou mez únavy kvůli dlouhé životnosti,
- odolnost vůči creepu a praskání (žárupevnost),
- rezistivitu vůči korozi a oxidaci za vysokých teplot (žáruvzdornost),
- nízkou tepelnou roztažnost pro udržení rozměrové stálosti, aby nedošlo k vymezení vůle mezi rotujícími částmi.

Důležitost superslitin niklu popisuje obr. 2, na němž je zobrazeno, pro jaké účely se v letadlovém motoru aplikují.



Obr. 2 Typické rozdělení materiálů v proudovém motoru [2].

1.1 Charakteristika a dělení superslitin

Jak již bylo uvedeno, superslitiny se dělí na podskupiny na základě chemického složení na tři hlavní skupiny. Na bázi Fe-Ni, Co nebo na bázi Ni [2].

Nikl je drahý feromagnetický kov s krystalovou mřížkou FCC (kubickou plošně centrovanou), hustotou 8908 kg.m^{-3} a teplotu tavení $1453 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako legující prvek se používá v 60 % z celkového objemu, 15 % jsou pak polotovary (plechy, pásy, tyče, dráty a trubky), zbylých 25 % se používá na výrobu niklových slitin [2,3].

Důležitý je také v oblasti povrchových úprav. Niklová vrstva zejména na ocelových produktech slouží jako ochrana vůči atmosférické korozi. V elektrotechnice se s ním můžeme setkat v podobě regulačních odporů, odporových teploměrů či alkalických akumulátorů. Jako konstrukční materiál bývá aplikován pro ventilové sedla, ucpávky pro přehřátou páru a pro součásti parních armatur [2,3].

Železo je kovový prvek s BCC (kubickou prostorově centrovanou) mřížkou. Hustota dosahuje 7874 kg.m^{-3} a teplota tavení $1539 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Železo má významné postavení ve výrobě ocelí, kde společně s uhlíkem tvoří soustavu železo-uhlík. V závislosti na teplotě se vyskytuje ve dvou krystalografických alotropických modifikacích. Modifikace α s BCC mřížkou je feromagnetická do teploty $712 \text{ }^{\circ}\text{C}$, nad touto teplotou ztrácí železo své feromagnetické vlastnosti. Mezi teplotami 912 až $1392 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se objevuje modifikace γ s FCC mřížkou. Nad touto teplotou až do teploty tavení železo opět nabývá BCC mřížku a označujeme jej modifikací δ [3].

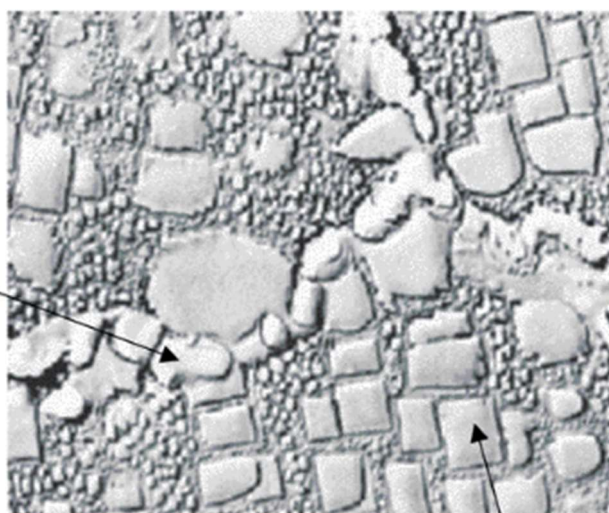
Kobalt má HCP (hexagonálně těsně uspořádanou) mřížku. Je to drahý, feromagnetický a polymorfní kov. Hustota kobaltu je 8900 kg.m^{-3} a teplota tavení $1495 \text{ }^{\circ}\text{C}$. HCP mřížka se při modifikaci α při teplotě $417 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mění na modifikaci β s FCC mřížkou. Kobalt je úspěšně využíván jako pojivo materiálů na bázi karbidů WC a TiC. Společně pomocí práškové metalurgie vznikají tvrdokovové materiály pro výrobu řezných nástrojů. Kobalt se také používá jako přísada do niklových slitin, protože stabilizuje vytvrzující fázi γ' tím, že zamezí jejímu zpětnému rozpuštění při zvýšených teplotách [3].

1.1.1 Základní strukturní fáze superslitin

Superslitiny jsou vysoce legovány a dosahují struktury s maticí γ , která má FCC mřížku a je tvořena tuhým substitučním roztokem. Složení mikrostruktury závisí na legujících prvcích, které zpevňují matici. Mezi ně patří Co, Cr, Mo, Fe, W, V, Ti, Al [3].

Důležitými přísadovými prvky jsou hliník a titan, ty tvoří hlavní vytvrzující fázi. Jsou zde také prvky karbidotvorné, které substitučně zpevňují niklovou matici a tvoří vlastní karbidy. Během rozpouštěcího ohřevu přísadové prvky přejdou ze svých sloučenin do tuhého roztoku a následujícím snížením teploty dojde k vytvoření metastabilního tuhého roztoku, při jehož stárnutí se vylučují disperzní precipitáty intermetalických sloučenin. Titan tvoří sloučeninu Ni_3Ti , hliník zase Ni_3Al . Pokud se ve slitině nachází oba prvky, vznikne fáze $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$, kterou považujeme za tuhý roztok titanu ve sloučenině Ni_3Al . Takovou zpevňující fázi označujeme γ' . S rostoucím objemem fáze γ' roste žárupevnost. Slitiny bohatě legované Al a Ti mají již charakter kovokeramického materiálu, zhoršuje se tedy jeho tvárnost. Na obr. 3 je zobrazena struktura materiálu s detailem na vyloučenou zpevňující fázi γ' a na disperzi karbidů vyloučenou po hranicích zrn [3].

**Karbidy
na hranicích
zrn**



**Precipitáty
fáze γ'**

Obr. 3 Mikrostruktura precipitačně vytvrzené superslitiny na bázi niklu [2].

K vyšší žárupevnosti lze dojít také pomocí disperze karbidů. Toho dosáhneme tepelným zpracováním, kdy se vytvoří karbidické fáze typu $M_{23}C_6$, M_7C_3 nebo M_6C po hranicích zrn, tam pak brání proti prokluzům. Kovovou složkou v karbidech bývá chrom nebo také molybden. Množství uhlíku bývá záměrně snižováno, protože uhlík odčerpává z matrice prvky zajišťující žáruvzdornost, tím je například zmiňovaný chrom. [3,4].

Pokud se ve slitině nachází znatelné množství niobu, objeví se ve speciálních slitinách základní zpevňující fáze γ'' . Tato fáze má podobu Ni_3Nb s BCT uspořádáním, tedy má tetragonální prostorově centrovanou krystalickou mřížku. Tento precipitát hraje klíčovou roli ve zpevnění struktury u některých slitin na bázi železa a niklu, především u důležité slitiny Inconel 718 [2].

V těchto materiálech se vyskytují také nežádoucí fáze. Jsou to topologicky uspořádané fáze (TPC), ke kterým řadíme například: σ fáze, μ fáze, Lavesovy fáze. Tyto nežádané struktury se vylučují na hranicích zrn a jsou zpravidla křehké a tvrdé. Je to způsobeno především jejich dlouhým, tenkým a protáhlým tvarem. Zhoršují mechanické a creepové vlastnosti materiálu. Z hlediska požadované dlouhé životnosti materiálu v náročných podmínkách se riziko poškození rapidně zvyšuje. TPC také berou z matrice prvky, díky kterým je materiál žáruvzdorný, což tuto schopnost snižuje [4].

1.1.2 Superslitiny na bázi niklu

Superslitiny na bázi niklu jsou nejvíce využívány ve vysokoteplotních sekcích letadlových motorů. Obsahují téměř 50 % z celkové váhy motoru. Tyto slitiny obsahují alespoň 50 % niklu [2].

Vysokoteplotní pevnost je zajištěna zpevněním tuhého roztoku γ , precipitačním zpevněním fází γ' - $Ni_3(Ti,Al)$ a v neposlední řadě zpevněním karbidickými částicemi. Žáruvzdornost je zajištěna díky legování hliníkem a chromem. Ty vytvářejí pasivační vrstvu oxidů Cr_2O_3 a Al_2O_3 . Do této skupiny patří například slitina Inconel 738, Inconel 713C, Udimet 700. U materiálů s vyšším hmotnostním procentem niobu (Inconel 718) převládá fáze γ'' . Tato fáze má však v porovnání s γ' nižší tepelnou stabilitu, proto se Inconel 718 používá při maximálních teplotách okolo 700 °C. Obsahy základních prvků ukazuje tab. 1.1 [2,5].

Tab. 1.1 Obsah základních prvků v superslitinách na bázi Ni [5].

Prvek	Ni	Ti	Al	Mo	Co	Cr	Nb	W	C
hm. %	37-79	0-5	0-6	0-28	0-20	5-22	0-5,1	0-15	<0,3

1.1.3 Superslitiny na bázi kobaltu

Superslitiny na bázi kobaltu mají výbornou rezistivitu vůči vysokoteplotní korozi. Někdy bývají aplikovány i při nižších teplotách kvůli jejich méně nákladné výrobě. Nahrazují tedy superslitiny na bázi niklu, ty musí být odlévány vakuově, zatímco kobaltové na vzduchu nebo pod argonem [2,5].

Kobaltové superslitiny nejsou zpevněny precipitáty, ale jen tuhým roztokem a karbidickými částicemi. Bývají legovány W, Mo, Ta, Nb, přičemž nejúčinněji působí W. Karbidické částice se vyskytují v podobě $M_{23}C_6$, M_7C_3 nebo M_6C . Díky absenci fáze γ' bývá pevnost při středních teplotách zpravidla nižší. Používají se tedy na méně zatěžované součásti. Do této skupiny řadíme například Haynes 25 nebo MP159. Obsahy základních prvků ukazuje tab. 1.2 [2,5].

Tab. 1.2 Obsah základních prvků v superslitinách na bázi Co [5].

Prvek	Co	Ni	Ti	Al	Mo	Fe	Cr	Nb	W	C
hm. %	<62	0-35	0-3	0-0,2	0-10	0-21	19-30	0-4	0-15	0-1

1.1.4 Superslitiny na bázi železa a niklu

Tyto superslitiny byly vyvinuty z austenitické korozivzdorné oceli. Vzhledem k tomu, že drahý nikl byl podstatně nahrazen železem, můžou být některé superslitiny hodnoceny jako tvářené austenitické oceli [2,5].

Vyšším obsahem niklu dosáhneme stabilizace austenitické matrice s FCC mřížkou. Nejčastější vytvrzovací fází je γ' . Zástupcem skupiny superslitin na bázi železa a niklu je například Incoloy 800. Obsahy základních prvků ukazuje tab. 1.3 [2,5].

Tab. 1.3 Obsah základních prvků v superslitinách na bázi Fe-Ni [5].

Prvek	Ni	Fe	Ti	Al	Mo	Co	Cr	Nb	W	C
hm. %	9-44	29-67	0-3	0,3-1	0-3	0-20	0-25	0,5	0-2,5	<0,35

1.1.5 Tepelné zpracování superslitin

Slitiny niklu se nejčastěji žihají, bývá to homogenizační, rekrytalizační nebo žihání na snížení pnutí. Dále také bývají vytvrzovány [3].

Právě vytvrzování je jejich nejnáročnější typ tepelného zpracování. Skládá se z rozpouštěcího ohřevu, ochlazení a umělého stárnutí. Těmito cykly se snažíme dosáhnout optimálního množství, tvaru, velikosti a způsobu vyloučení zpevňující fáze ve slitině. Teplota rozpouštěcího ohřevu by měla být dost vysoká pro nejúplnější rozpuštění fáze γ' . Hodnoty teplot se pohybují mezi 1080 °C až 1220 °C a cyklus trvá 2 až 12 h. Ohřev je prováděn ve vakuových pecích nebo v pecích s ochrannou atmosférou, kvůli zamezení ochuzení povrchu součásti legujícími prvky. Ochlazení se provádí obvykle na vzduchu, protože ochlazování ve vodě vede ke vzniku mikrotrhin právě u vysokolegovaných slitin. Stárnutí poté probíhá při ohřevu na teplotu vyšší, než je provozní teplota součásti, v krajním případě na teplotu stejnou. Teploty se pohybují mezi 700 až 950 °C. Při tomto procesu se z přesyceného tuhého roztoku vylučují precipitáty fáze γ' a karbidy. U některých slitin probíhá stupňovité stárnutí, důvodem je co nejúplnější vyloučení fáze γ' čímž roste žárupevnost [3].

1.2 Popis a využití Inconelu 718

Tato superslitina na bázi niklu nese název, který je obchodní značkou společnosti Special Metals. Typ 718 je vytvrditelná slitina, která spojuje vysokou pevnost až 1240 MPa do teplot 700 °C, žáruvzdornost a žárupevnost spolu s vynikající svařitelností. Hustota Inconelu 718 je 8190 kg.m⁻³ a teplota tavení se pohybuje v rozmezí 1260-1336 °C. Youngův modul pružnosti dosahuje 200 GPa. Tvrdost se pohybuje podle tepelného zpracování mezi 25-45 HRC. Teploty pro provoz součástí z tohoto materiálu jsou od -250 °C až do 750 °C. Tepelná vodivost materiálu je 11.4 W.m⁻¹.K⁻¹. Z technologického hlediska se Inconel 718 řadí do skupiny těžkoobrobitelných materiálů [6,7].

Jak již bylo uvedeno, u Inconelu 718 převládá díky přítomnosti zvýšeného procenta niobu vytvrdzující fáze γ'' s nižší tepelnou stabilitou, proto se využívá zpravidla při nižších teplotách než ostatní slitiny na bázi niklu. Mimo letecký průmysl najde Inconel 718 uplatnění ve spalovacích turbínách, při extrakci ropy a plynu, v jaderném průmyslu nebo motorsportu. Zastoupení jednotlivých prvků v této slitině popisuje tab. 1.4 [6,7].

Tab. 1.4 Obsah prvků v superslitině Inconel 718 [7].

Chemický prvek	Zastoupení v procentech [%]
Nikl	50,00-55,00
Chrom	17,00-21,00
Železo	Proměnlivá hodnota
Niob + Tantal	4,75-5,50
Molybden	2,80-3,30
Titan	0,65-1,15
Hliník	0,20-0,80
Kobalt	Max. 1,00
Uhlík	Max. 0,08
Mangan	Max. 0,35
Křemík	Max. 0,35
Fosfor	Max. 0,015
Síra	Max. 0,015
Bór	Max. 0,006
Měď	Max. 0,30

1.2.1 Tepelné zpracování Inconelu 718

U této superslitiny se používají dva typy tepelného zpracování. Jak bylo uvedeno výše u obecné charakteristiky superslitin, jsou to precipitační vytvrzování neboli stárnutí a rozpouštěcí žihání. Co se obrábění týče, tak pro odběr většího množství materiálu je vhodné materiál vyžíhat. Pro dokončovací operace s ohledem na kvalitu povrchu, je lepší obrábět materiál ve vytvrzeném stavu [12].

Proces žihání a stárnutí se skládá z rozpouštěcího žihání při určitých teplotách, poté následuje rychlé ochlazení většinou ve vodě. Následuje precipitační vytvrzování za zvýšených teplot po několik hodin. Poté se materiál pomalu ochlazuje v peci na teplotu, při které stárne až 20 hodin. Následuje ochlazování na vzduchu [12].

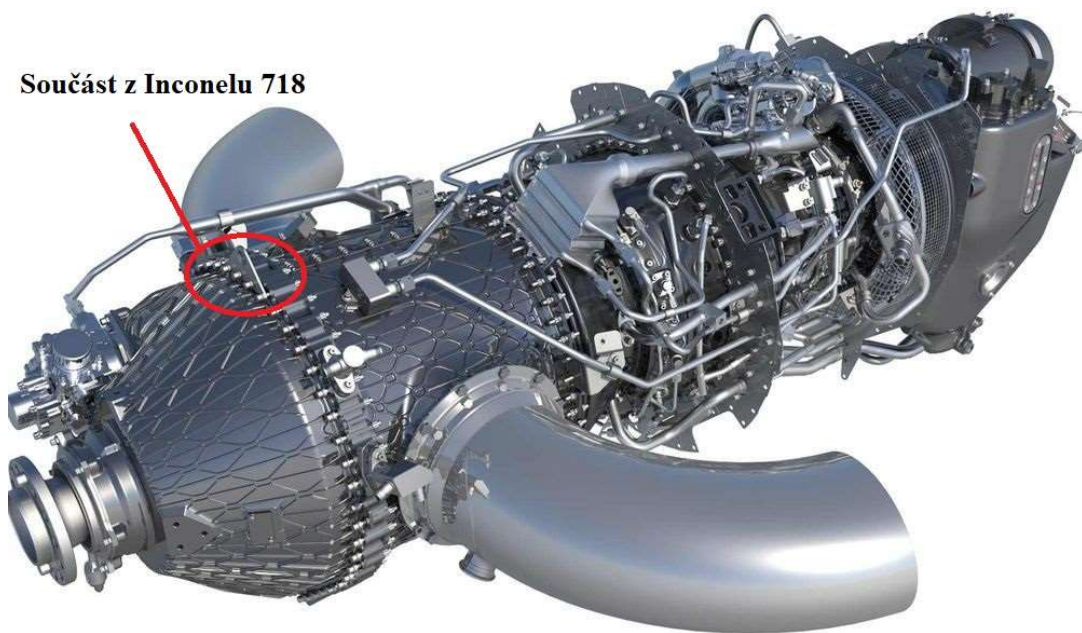
Pokud potřebujeme vysokou pevnost, životnost a odolnost vůči iniciaci trhliny a jejímu následnému šíření, pak žihání probíhá mezi teplotami 930 °C až 1010 °C. Vytvrzování trvá 8 hodin při teplotě 720 °C a stárnutí 18 hodin při 620 °C. Tímto způsobem dosáhneme tvrdosti za pokojové teploty až 331 HB [12].

Chceme-li dosáhnout dobré houževnatosti pro součásti namáhané na tah, pak ohřev probíhá mezi teplotami 1040 °C až 1065 °C. Materiál se vytvrzuje 10 hodin při 760 °C a stárne 20 hodin za teploty 650 °C. Touto metodou dosáhneme při pokojové teplotě tvrdosti až 341 HB [12].

1.2.2 Konkrétní využití Inconelu 718

Konstruování součástí z tohoto materiálu díky vlastnostem, kterými disponuje, je široké. Pro lepší představu je uveden reálný příklad z praxe. Tím je součást, která bude montována do zcela nového typu turbovrtulového motoru, dříve Advanced Turboprop (ATP), nyní General Electric Catalyst na obr. 4 [8].

Součást z Inconelu 718



Obr. 4 Turbovrtulový motor firmy GE Aviation Czech s detailem na součást z Inconelu 718 [8].

Tento motor vyvíjí společnost GE Aviation Czech, která spadá pod jeden z největších světových konglomerátů General Electric. Motor Catalyst bude mít kompresní poměr 16:1 s nižší spotřebou paliva až o 20 % než současné motory. Výkon na hřídeli 1240 koňských sil ho řadí do kategorie motorů pro všeobecné letectví s výkonem 1000 až 6000 koní. V porovnání s konkurencí má o 10 % vyšší výkon za letu. Konstrukce motoru Catalyst předpokládá interval mezi opravami 4000 až 6000 letových hodin. Jedná se o první turbovrtulový motor zcela nového designu v segmentu všeobecné a obchodní letecké přepravy po více než 30 letech. V roce 2018 proběhla úspěšně první zkouška motoru Catalyst. S novými motory se počítá pro nový letoun Cessna Denali od společnosti Textron Aviation [8].

Komponenta z Inconelu 718 v tomto motoru nese název Lifting Lug a slouží ke zvedání či přepravě pohonné jednotky. Tato komponenta je zobrazena na obr. 5. Polotovarem pro výrobu této součásti je výpalek řezaný vodním paprskem. Výpalek je opatřen přídávky pro následné obrobení, aby se dosáhlo požadovaných rozměrů s příslušnými tolerancemi. Technologie vodního paprsku je dražší než řezání plasmou, důvodem pro tuto volbu je zabránění tepelného ovlivnění součásti. Jelikož se Inconel 718 řadí mezi těžkoobrobitelné materiály, výroba i takto jednoduché součásti může být velmi komplikovaná. Právě kvůli snížené schopnosti obrobít takovéto materiály, byla další kapitola věnována tomuto tématu.



Obr. 5 Polotovár pro výrobu součásti Lifting Lug.

1.3 Charakteristika obrobiteľnosti materiálu

Technologie obrábění jako jedna z metod strojírenské technologie je velmi důležitá. Používáme ji pro výrobu nástrojů pro různé výrobní technologie nebo již pro hotové součásti. Stejně jako jiné metody strojírenské technologie, které jsou založeny na působení tlaku na plochu, tak i tato metoda je obecně založena na působení nástroje ve tvaru klínu na obráběný materiál. Jinými slovy je to proces plastické deformace, který probíhá za extrémních podmínek zatěžování, tedy za vysokých tlaků, teplot a vysoké deformační rychlosti [9].

Díky neustálému vývoji ať už v oblasti výrobních strojů nebo v oblasti řezných nástrojů, můžeme pracovat efektivněji. Vývoj nám umožňuje například šetřit energii kvůli menším strojním časům a tím také životní prostředí. Umožňuje nám také obrobit i složitější moderní materiály, jakými jsou právě superslitiny [9].

Obrobiteľnosť je jakýsi souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení materiálu na průběh a na ekonomické či kvalitní výsledky procesu řezání. Obrobiteľnosť se posuzuje z hlediska vlivu materiálu obrobku na intenzitu otěru, z hlediska energetické bilance procesu řezání, z hlediska jejich vlivu na proces tvoření třísky a také z hlediska vytváření povrchů na obrobcích. Jmenovitě nejdůležitějšími faktory ovlivňující obrobiteľnosť jsou [9]:

- způsob výroby a tepelného zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění a řezné podmínky,
- geometrie nástroje, druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Z technologického hlediska se jedná o jednu z nejdůležitějších vlastností materiálu, dá se interpretovat jako míra schopnosti daného materiálu být zpracováván některou z metod obrábění. Při provádění komparačních testů obrobiteľnosti, jsou použity celkové nebo přepočtené veličiny. Jsou to zejména celkové síly F [N] potřebné pro překonání odporu materiálu během procesu obrábění (F_c [N] - řezné síly, F_f [N] - posuvové, F_p [N] - pasivní) a řezné momenty M_c [Nm]. Dále také velikost teploty řezání, velikost potřebné energie, dosažená kvalita povrchu a druh vytváření a dělení třísky [9].

V neposlední řadě také opotřebení břitů řezného nástroje. Tyto veličiny se dále hodnotí a dle výsledků se řadí do skupin, které popisuje obr. 6. Tohle rozdělení, které je v souladu s mezinárodními standardy ISO, nám mimo jiné pomáhá zvolit vhodný řezný nástroj a jeho geometrii pro obrobení konkrétního materiálu [9].



Obr. 6 Dělení materiálů dle jejich obrobiteľnosti [10].

ISO P je co do využívání materiálů skupinou nejrozšířenější. Dále se dělí na typy nelegovaných až vysokolegovaných materiálů, ocelí na odlitky a korozivzdorných ocelí s feritickou či martenzitickou strukturou. Jejich obrobiteľnost je většinou dobrá, závisí však na tvrdosti materiálů, obsahu uhlíku a dalších faktorech [10].

ISO M jsou korozivzdorné materiály s minimem 12 % legujícího chromu, který těmto materiálům zajišťuje právě korozivzdornost formou pasivační vrstvy. Mezi další přísady patří nikl a molybden. Patří sem různé druhy slitin s feritickou, martenzitickou, austenitickou nebo feriticko-austenitickou (duplexní) strukturou. Snížená schopnost obrobit tyto materiály je zapříčiněna nízkou tepelnou vodivostí těchto materiálů, kdy z řezu teplo formou třísky neodchází dostatečně a břit nástroje pak podléhá opotřebení kvůli vysokým teplotám [10].

ISO K na rozdíl od ocelí jsou materiály tvořící krátkou třísku. Obrobení šedé nebo temperované litiny je snadné, zatímco litiny izotermicky kalené a litiny s vermikulárním grafitem se obrábí obtížněji. Tyto materiály obsahují SiC působící na břit abrazivně [10].

ISO N je skupinou neželezných kovů. Zde patří měkké materiály jako hliník, mosaz atd. Hliníkové slitiny s více než 13 % Si jsou velmi abrazivní. Jakýmsi pravidlem při obrábění materiálů této skupiny je použití pozitivní geometrie břitu, poté lze očekávat dlouhou životnost nástrojů při vysoké řezné rychlosti [10].

ISO H zahrnuje oceli s tvrdostí 45 až 65 HRC a také tvrzené litiny s tvrdostí okolo 400 až 600 HB. Kvůli vysoké tvrdosti jsou materiály obtížně obrobiteľné. Při jejich obrábění vzniká velké množství tepla a na břit působí velmi abrazivně [10].

Ostatní materiály nejsou obsaženy v ISO standardech. Jedná se o termoplasty, termosety, polymery, plasty vyztužené skelnými vlákny nebo uhlíkovými vlákny. Dále také kompozity z uhlíkových vláken, tvrdé pryže a technický grafit [10].

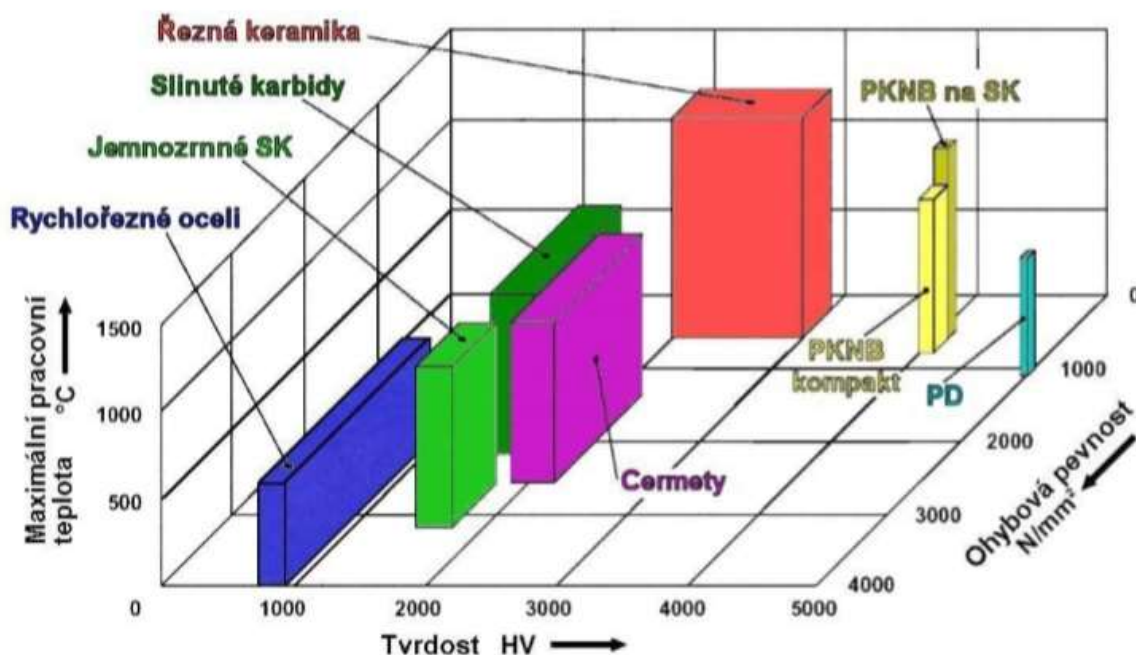
ISO S jsou žárovzdorné slitiny zahrnující velkou řadu vysokolegovaných materiálů na bázi železa, niklu, kobaltu a titanu. Tyto materiály při obrábění snadno ulpívají na břitu a tvoří nárůstek. Zde platí podobná vlastnost jako u ISO M, tedy že v místě řezu vzniká velké množství tepla. Obrábění je však mnohem komplikovanější a trvanlivost břitů nástrojů kratší [10].

1.4 Materiály řezných nástrojů

Požadované vlastnosti řezných nástrojů jsou následující [13]:

- velká tvrdost a pevnost v tlaku,
- vysoká pevnost v ohybu a houževnatost,
- vysoká odolnost proti otěru,
- vysoká tepelná odolnost.

Na konkrétní obráběcí úloze pak záleží, které z uvedených požadavků budou stěžejní. Řezné materiály pro třískové obrábění se dají rozdělit podle vlastností kterými disponují, to popisuje obr. 7. Jelikož se tato práce zabývá obrobiteľností materiálu spadající pod těžkoobrobiteľné materiály typu ISO S, budou popsány nástrojové materiály schopné aplikace pro obrábění takovéto třídy.



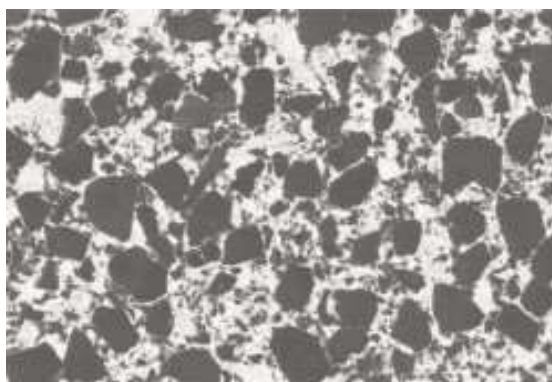
Obr. 7 Rozdělení řezných materiálů dle jejich vlastností [14].

1.4.1 Slinutý karbid

Při třískovém obrábění hrají významnou roli slinuté karbidy, které se vyrábějí z řady různých karbidů a kovového pojiva bohatého na kobalt. Tyto nástroje se dělí podle normy ISO na aplikační skupiny P, M, K, N, S a H dle výše uvedené charakterizace obrobiteľnosti materiálů. Pro kovoobrobění slinuté karbidy obsahují až 80 % tvrdé fáze karbidu wolframu (WC). Další důležitou příměsí je karbonitrid titanu. Polotovár pro výrobu takových nástrojů je vytvořen buď lisováním prášku nebo vstřikováním do formy, poté je dál slinován až na plnou hustotu [11,13].

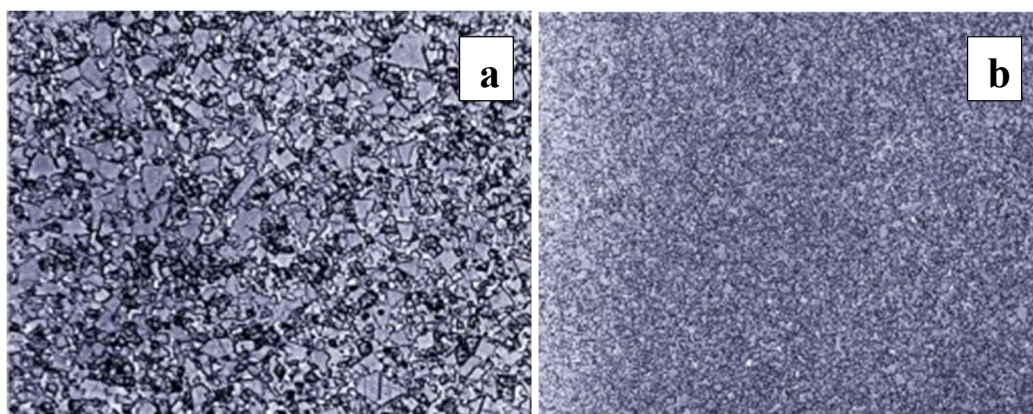
Jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňující tvrdost nebo houževnatost nástroje je velikost zrna WC. Houževnatost a odolnost proti plastické deformaci se dá vylepšit také

složením pojiva obohaceného o Co. Příliš nízkým obsahem pojiva se projeví křehkost daného nástroje. Pro zvýšení tvrdosti jsou přidávány již zmiňované karbonitridy titanu. Kombinace dobré odolnosti proti plastické deformaci a houževnatosti bříty lze dosáhnout gradienty. Karbonitridy titanu jsou koncentrovány v oblasti bříty, tam zvyšují tvrdost za vysokých teplot, ve vzdálenějších místech od bříty zase brání zvýšené množství pojiva s karbidy wolframu iniciaci trhlin a jejich šíření kvůli rázům vznikajících při obrábění. Na obr. 8 je zobrazena gradientní struktura slinutého karbidu [11].



Obr. 8 Gradientní zrnitost slinutého karbidu [11].

Na obr. 9a můžeme vidět střední až velkou velikost zrn WC. Taková struktura se v kombinaci s různými povlaky používá pro všechny oblasti použití. Na obr. 9b je malá či submikroskopická velikost zrn WC. Taková velikost zrn se používá pro vyztužení řezné hrany opět v kombinaci s vhodným povlakem. Výhodou je dobrá odolnost vůči tepelnému a cyklickému namáhání. Používají se pro výrobu vrtáků, stopkových fréz a břitových destiček pro upichování [11].



Obr. 9 Střední až velká zrnitost slinutého karbidu (a), malá či submikroskopická zrnitost slinutého karbidu (b) [11].

Zajímavou skupinou jsou slinuté karbidy bez povlaku. Tyto třídy se skládají přímo z WC a Co pojiva nebo obsahují velké množství kubických karbonitridů. Použití je velmi

malé. Typickou aplikací je obrábění žáruvzdorných nebo titanových slitin. Opotřebení břitů je rychle s projevující se samoostřící schopností [11].

Povlakováním slinutých karbidů se dosahuje prodloužení životnosti nástroje, nižší řezné síly, vyšší řezné rychlosti a rychlosti posuvu, lepší jakosti povrchu, lepšího obrábění na sucho a snadnějšího obrábění tvrdých materiálů do 68 HRC. Slinuté karbidy se nejčastěji povlakuji za pomoci dvou metod [13]:

- metoda CVD (Chemical Vapor Deposition),
- metoda PVD (Physical Vapor Deposition).

CVD metoda je založena na chemickém vylučování z plynné fáze. Hodí se pro vícevrstvé povlaky, protože pomocí plynné fáze lze dosáhnout různého složení vrstev, ty se mohou nanášet na povrch v různé tloušťce a pořadí. Touto metodou je opatřena většina nástrojů ze slinutého karbidu. CVD metoda se dělí na dva typy HT (vylučování při vysoké teplotě) a MT (vylučování při střední teplotě). Nástroje povlakované typem HT-CVD vynikají dobrou odolností vůči opotřebení díky větší tloušťce vrstvy. U soustružení vrstva dosahuje 12 μm a u frézování 6 μm . Nevýhodou je snížená houževnatost. Nástroje povlakované typem MT-CVD s ohledem na nižší teplotu povlakování jsou méně tepelně zatížené. Jsou však náchylnější k oteru. Zároveň se zmenšuje riziko vylučování uhlíku z nástrojových substrátů, tím se zamezí vzniku křehkých kovových fází. Tyto nástroje najdou vzhledem k výborné houževnatosti uplatnění hlavně při frézování [13].

PVD metoda funguje na principu fyzikálního vylučování ve vakuu. Oproti CVD metodě spočívá ve vylučování vysokotavitelných látek při nízkých teplotách, s tím je spojené šetření substrátu. Pevnost v ohybu substrátu zůstává po povlakování téměř neovlivněna. Výhodou je také menší tloušťka vrstvy, což poskytuje možnost přesněji obrábět díky ostrému břítu s menším poloměrem špičky [13].

Za zmínku stojí také relativně nová metoda zvaná HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering). Tato technologie vytváří plazmu s vysokým podílem ionizovaných atomů tvořících povlak. Výhodou této metody je tvorba extrémně hladkých, odolných a homogenních vrstev povlaků. Typů povlaků je velké množství, tabulka 1.5 popisuje vlastnosti alespoň některých z nich [14,17].

Tab 1.5 Vlastnosti vybraných povlaků [14].

Povlak	Tloušťka [μm]	Mikrotvrдость [GPa]	Součinitel tření [-]	Max. prac. teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Barva
TiN	1-7	24	0,55	600	zlatá
TiAlN	1-4	35	0,50	800	fialovo/černá
TiCN	1-4	37	0,20	400	modrošedá
AlTiN	1-4	38	0,70	900	černá

1.4.2 Řezná keramika

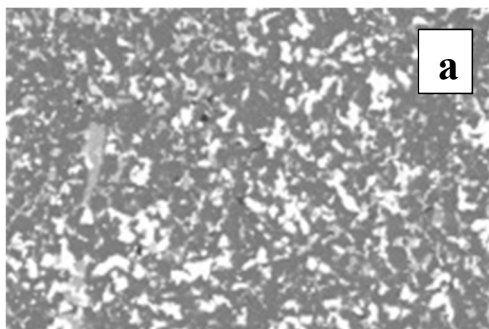
Keramika je krystalický materiál obsahující hlavně anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Vyznačuje se především svou odolností vůči vysokým teplotám, opotřebením, vysokou tvrdostí a také chemickou inertností. Pro výrobu se používají následující materiály: Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 , karbidy TiC, TiN a nitrid Si_3N_4 [14].

Dle sloučenin, které jsou v materiálu obsaženy, rozdělujeme řeznou keramiku na [11]:

- smíšenou keramiku,
- keramiku vyztuženou whiskery,
- keramiku na bázi nitridu křemíku,
- oxidovou keramiku,
- sialon.

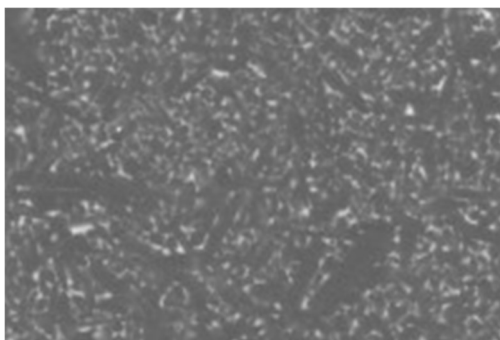
Smíšená keramika je vyztužena částicemi kubických karbidů nebo karbonidtridů (TiC, Ti(C,N)). Takový materiál je pak houževnatý a lépe vede teplo. Na obr. 10a je jeho struktura zobrazena [11].

Keramika vyztužená whiskery obsahuje karbidy křemíku, díky tomu se razantně zvýší její houževnatost a dovoluje použití řezných kapalin při obrábění. Tyto materiály jsou vhodné pro obrábění niklových slitin. Na obr. 10b je struktura takového materiálu [11].



Obr. 10 Struktura smíšené keramiky (a), Struktura vyztužené keramiky whiskery (b) [11].

Keramika na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) má krystaly podlouhlého tvaru (obr. 11) a vytváří materiál se schopností samovyztužení. Nástroje z tohoto materiálu jsou vhodné pro obrobení šedé litiny. Jejich další použití je omezeno kvůli nízké chemické stabilitě [11].



Obr. 11 Struktura keramiky na bázi nitridu křemíku [11].

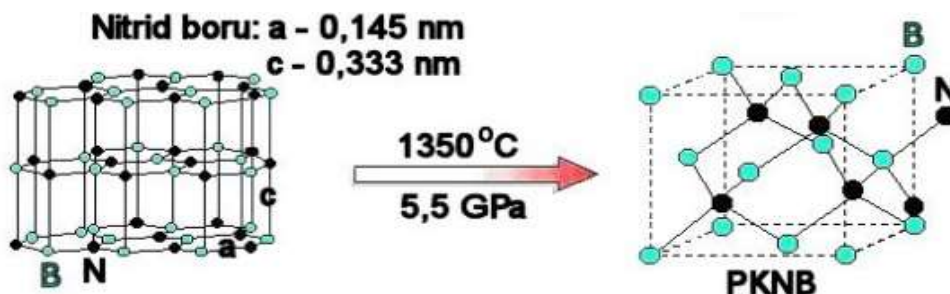
Oxidová keramika se skládá především z Al_2O_3 doplněného ZrO_2 . Oxid zirkoničitý brání vzniku a šíření trhlin. Tento materiál je chemicky stabilní, postrádá však odolnost vůči teplotním šokům, což je jeden z hlavních nedostatků řezné keramiky [11].

Sialon jsou třídy kombinující pevnost a chemickou stabilitu. Pevnost je dosažena díky samovyztužovací síti z nitridu křemíku. Tyto materiály jsou ideálním zástupcem nástrojů pro obrábění žáruvzdorných slitin [11].

1.4.3 Polykrystalický kubický nitrid boru

Využití tohoto materiálu společně s polykrystalickým diamantem není zatím tak rozšířené jako u slinutého karbidu nebo řezné keramiky. Dostává se však do popředí díky schopnosti obrobit efektivně velmi tvrdé materiály až do 65 HRC. V porovnání s řeznou keramikou se projevuje ještě vyšší tvrdostí a houževnatostí. Polykrystalický kubický nitrid boru dokáže pracovat za extrémních teplot, přitom má dobrou chemickou stabilitu. Jednotlivé vlastnosti tohoto materiálu závisí na jeho složení a druhu pojiva, z čehož plyne, že existuje více druhů tohoto materiálu [16].

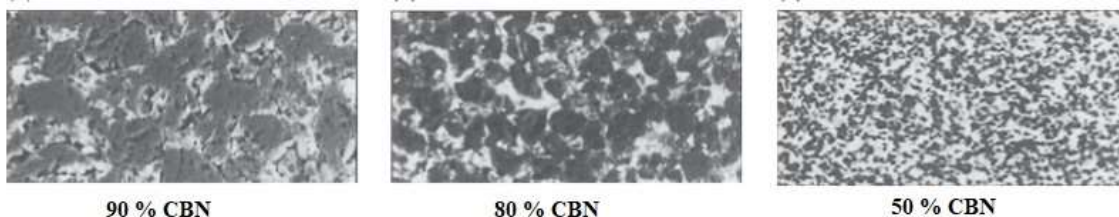
Průmyslově probíhá výroba CBN z nitridu boru, ten má hexagonální mřížku. Působením vysoké teploty a tlaku se mřížka nitridu boru přemění na kubickou (obr. 12). Takováto transformace mřížky se projeví vznikem velkých vnitřních pnutí, což má za následek podstatný nárůst tvrdosti materiálu na hodnoty v rozmezí 5000-8000 HV. Pevnost v tahu dosahuje až 280 GPa a CBN je tepelně stálý i v rozmezí teplot 1500-1600 °C [14].



Obr. 12 Transformace hexagonální mřížky nitridu boru na kubickou [14].

Řezné materiály dělíme na 3 skupiny dle obsahu CBN v procentech (obr. 13) [16]:

- s obsahem okolo 90 % CBN a další kovou fází (Al),
- s obsahem okolo 80 % CBN a další kovovou či keramickou fází,
- s obsahem méně než 70 % CBN a další keramickou fází (TiN nebo TiC).



Obr. 13 Struktura řezného materiálu v závislosti na obsahu CBN v procentech [16].

Skupina s obsahem menším než 70 % CBN se používá pro obrábění tvrdých, kalených materiálů, žáruvzdorných a nástrojových ocelí. Řezný nástroj může mít podobu klasické vyměnitelné břitové destičky plně z tohoto materiálu nebo může být pouze napájen na destičku ze slinutého karbidu v podobě řezné hrany či po celé ploše destičky. Typ s vysokým obsahem CBN disponuje velmi dobrou houževnatostí a otěruvzdorností, je proto využíván pro obrábění tvrdých litin nebo kalených ocelí s velkým přídavkem k čistému rozměru. V této sortě bývá destička plně z tohoto řezného materiálu. Na obr. 14 jsou podoby řezného materiálu z CBN v praxi [16].



Obr. 14 Vyměnitelné břitové destičky z CBN [16].

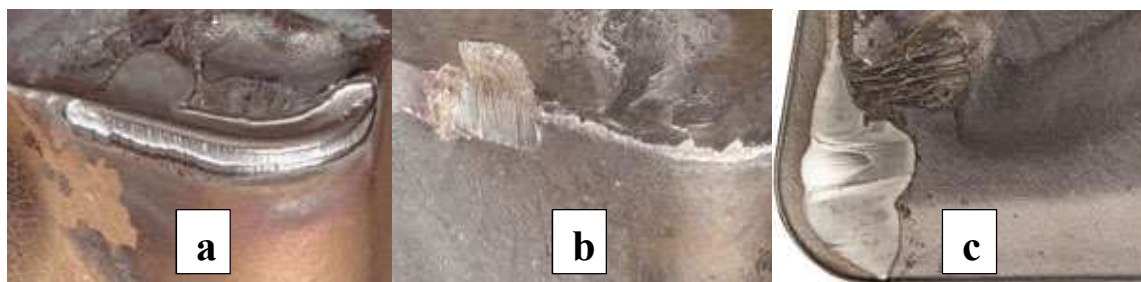
1.4.4 Mechanismy opotřebení bříty

K optimalizaci procesů obrábění je vhodné znát základní příčiny opotřebení řezných nástrojů. Tyto znalosti pak můžou být aplikovány k upravení procesu tak, aby k takovým poškozením docházelo minimálně. Dále budou uvedeny základní mechanismy opotřebení bříty VBD ze slinutého karbidu i s fotodokumentací.

Abrazivní opotřebení na hřbetu. Nejčastější a lze u něj spolehlivě předvídat životnost nástroje. Vznik je způsoben abrazí pomocí tvrdých částic v obráběném materiálu. Tento mechanismus popisuje obr. 15a [18].

Adhezni vytvoření nárůstku. Tlakovým navařováním částí třísky na břitovou destičku, nejčastěji při obrábění materiálů snadno ulpívajících na bříty, dochází k tomuto poškození. Mezi takové materiály patří nízkouhlíkové, korozivzdorné nebo hliníkové slitiny. Tento mechanismus je na obr. 15b [18].

Chemické opotřebení ve tvaru žlábků. K tomuto opotřebení dochází na čele břitové destičky. Příčinou je chemická reakce mezi obrobkem a nástrojem. Zvýšením řezné rychlosti se zvýší i riziko chemického opotřebení. Břit ovlivněn tímto mechanismem je zeslaben, a je náchylný k lomu. Opotřebení ve tvaru žlábků ukazuje obr. 15c [18].



Obr. 15 Opotřebení VBD ze slinutého karbidu dle výše popsaných mechanismů [18].

Adhezní opotřebení ve tvaru vrubu způsobuje poškození v úrovni hloubky řezu jak na čele, tak i na hřbetu břitové destičky. Příčinou je opět tlakové navařování třísky doprovázené deformačním zpevněním obrobku. Toto opotřebení je typické při obrábění korozivzdorných a žáruvzdorných slitin. Na obr. 16a je vidět tohle poškození [18].

Tepelné trhliny se na břitu objevují, když se teplota břitu neustále mění. Tohle poškození je typické pro frézovací operace s přerušovanými řezy. Použití řezné kapaliny vznik tepelných trhlin ještě podpoří. Tepelné trhliny jsou vidět na obr. 16b [18].

Tepelná plastická deformace je způsobena změknutím nástrojového materiálu. Toto změknutí nastává, když je teplota v místě řezu pro danou třídu nástrojového materiálu příliš vysoká. Řešením tohoto problému může být použití tvrdší třídy nástrojového materiálu a tenčího povlaku. Tento jev ukazuje obr. 16c [18].



Obr. 16 Opotřebení VBD ze slinutého karbidu dle výše popsaných mechanismů [18].

Mechanické vylamování břitu nebo celkový lom jsou zapříčiněny přetížením břitu mechanickým tahovým namáháním. Toto vzniká v důsledku zasekávání třísek, vysoké hodnoty posuvu a hloubky řezu, vibrací, vměstky písku v obrobku či nadměrného opotřebení břitové destičky. Toto poškození popisuje obr. 17 [18].



Obr. 17 Opotřebení VBD ze slinutého karbidu dle výše popsaného mechanismu [18].

1.5. Obrábění Inconelu 718

Tato podkapitola je rozdělena na dvě části. V první části je popsána kinematika a základní vzorce pro frézovací operace, a to z toho důvodu, že je tato bakalářská práce zaměřena především na čelní frézování. Ve druhé části jsou shrnuty zkušenosti s frézováním právě Inconelu 718.

1.5.1 Kinematika a základní výpočtové vzorce pro parametry frézování

Frézování je obráběcí metoda založená na odebírání materiálu obrobku břitý rotujícího nástroje. Vedlejší pohyb koná nejčastěji obrobek převážně ve směru kolmém na osu nástroje. Řezný proces je přerušovaný a každý zub frézy odděluje krátké třísky proměnné tloušťky [14].

V závislosti na aplikovaném nástroji rozdělujeme frézování z technologického hlediska na válcové a čelní. Od těchto hlavních typů jsou odvozené způsoby okružní či planetové [14].

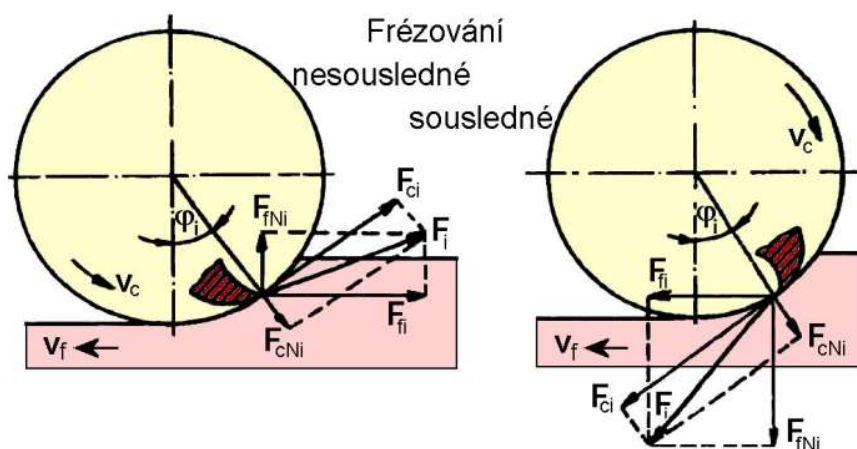
Válcové frézování se realizuje převážně s válcovými a tvarovými frézami. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou rotační frézy. V závislosti na kinematice dělíme válcové frézování na sousledné a nesousledné, to popisuje obr. 18 [14].

Sousledné frézování spočívá v rotaci nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí většinou směrem dolů proti stolu stroje. Výhody sousledného frézování [14]:

- vyšší trvanlivost břitů, použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- menší potřebný řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, jednodušší upínání,
- menší sklon ke kmitání soustavy, lepší jakost obrobeného povrchu.

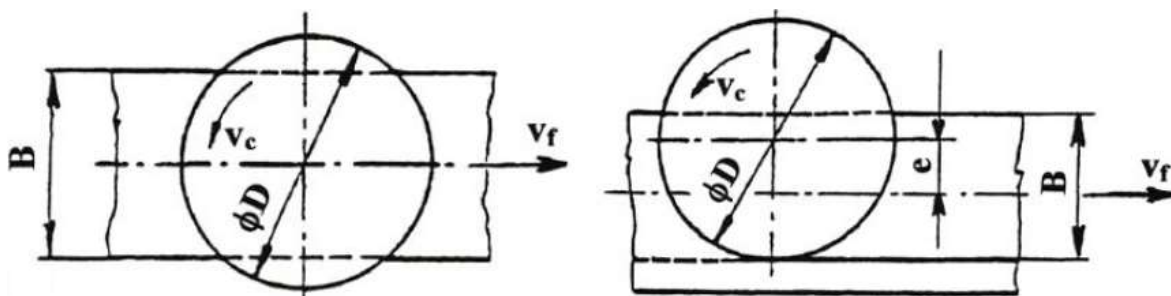
Nesousledné frézování probíhá, když rotace nástroje je proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku a tloušťka třísky se mění z nulové hodnoty na maximální. Jedna ze složek řezné síly působí při nesousledném frézování směrem nahoru. Výhody tohoto typu frézování [14]:

- trvanlivost nástroje nezávisí na okujích apod.,
- menší opotřebení šroubu a matice,
- záběr zubů při jejich vřezávání nezávisí a hloubce řezu.



Obr. 18 Řezné síly na zubu válcové frézy. F_i - celková řezná síla, F_{ci} - řezná síla, F_{cNi} - kolmá řezná síla, F_{fi} - posuvová síla, F_{fNi} - kolmá posuvová síla [14].

Čelní frézování je realizováno pomocí čelních fréz. Ty mají břity na obvodě i čele nástroje. Dle polohy osy frézy vůči frézované ploše dělíme symetrické a nesymetrické čelní frézování. U symetrického čelního frézování je osa nástroje ve středu obráběné plochy, a u nesymetrického je mimo. Při čelním frézování pracuje nástroj sousledně i nesousledně současně. Tento typ popisuje obr. 19 [14].



Obr. 19 Čelní frézování symetrické (vlevo), nesymetrické (vpravo) [14].

Pro čelní frézování a frézování jako takové existuje celá řada vzorců, díky nimž můžeme stanovit různé parametry. Základním parametrem hlavního rotačního pohybu, je řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], jejíž hodnota se vypočítá dle vztahu 2.1 [9].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Jednotkou vedlejšího posuvového pohybu je posuv na zub f_z [mm], to je délka posunu obrobku při záběru jednoho zubu. Z posuvu na zub můžeme vypočítat posuv na otáčku f_n [mm], což je délka dráhy, o kterou se obrobek posune za jedno otočení nástroje. Tato veličina se vypočítá pomocí vztahu 2.2 [9].

$$f_n = f_z \cdot z \quad (2.2)$$

Samotná posuvová rychlost v_f [mm.min⁻¹] se vypočítá podle vztahu 2.3 [9].

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (2.3)$$

Tloušťka odebírané třísky h_i [mm] se mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i [°] a je také ovlivněna úhlem nastavení hlavního ostří κ_r [°]. Hodnota tloušťky třísky se vypočte pomocí vzorce 2.4 [9].

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad (2.4)$$

Jmenovitá šířka třísky b_i [mm] je konstantní při jakémkoli úhlu φ_i [°], vypočte se pomocí vztahu 2.5 [9].

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (2.5)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} [mm²] se pak vypočte na základě vztahu 2.6, přičemž tříska nabývá maximálního průřezu v okamžiku, kdy úhel $\varphi_i = 90^\circ$ (viz obr. 20) [9].

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.6)$$

Řezné síly pro překonání odporů se při frézování stanovují na jednom břitu, který má polohu vázanou úhlem φ_i [°]. Řezná síla F_{ci} [N] se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} [N. mm⁻²] a průřezu třísky A_{Di} [mm²]. Výpočet lze realizovat vzorcem 2.7 [9].

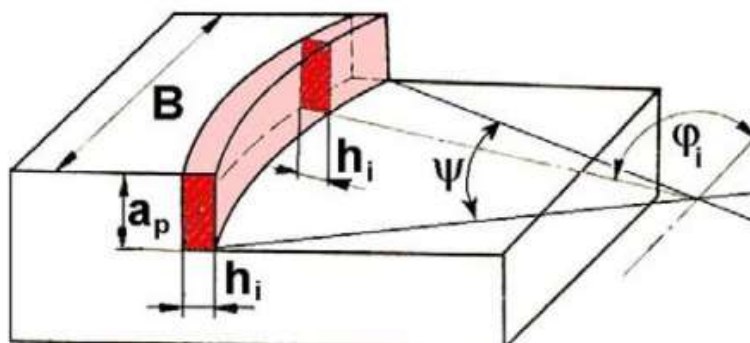
$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.7)$$

K hodnotě měrné řezné síly k_c [N. mm⁻²] se dojde pomocí vztahu 2.8, kdy k_{c11} [N. mm⁻²] je základní hodnota měrné řezné síly pro jednotkový průřez třísky $A_D = b \cdot h = 1 \cdot 1 = 1$ mm². Parametr m_c je konstanta. Parametry k_{c11} a m_c jsou mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu a stanovovány jsou experimentálně [20].

$$k_c = k_{c11} \cdot h^{-m_c} \quad (2.8)$$

Pro ověření, zda je obráběcí stroj vhodný pro danou operaci či nástroj, se počítá užitečný řezný výkon P_c [kW]. Tento parametr se vypočte na základě vztahu 2.9, kde a_p [mm] je axiální hloubka řezu a parametr a_e [mm] je radiální hloubka řezu [21].

$$P_c = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6} \quad (2.9)$$



Obr. 20 Průřez třísky při čelním frézování [14].

1.5.2 Problematika frézování Inconelu 718

Jak již bylo zmíněno výše, Inconel 718 patří mezi těžkoobrobitelné materiály, je to dokonce jeden z nejhůře obrobitelných materiálů vůbec. Tato vlastnost je způsobena následujícími faktory, které přímo působí na opotřebení břitu řezného nástroje a zvyšují odpor a tím i řezné síly během procesu [24,25]:

- vysoká tendence k deformačnímu zpevnění (po počátečním řezu je povrch obrobku velmi tvrdý, což vede ke snížené životnosti nástroje),
- tvorba nárůstku a mikrosvarů mezi nástrojem a obrobkem (z důvodu vyšší adheze materiálu),
- přítomnost karbidů titanu nebo niobu v mikrostruktuře (tvrdé částice v materiálu zvyšují pravděpodobnost abrazivního opotřebení nástroje),
- nízká tepelná vodivost materiálu (teplo se z místa řezu dostatečně neodvádí třískou).

1.5.3 Frézování Inconelu 718 nástroji ze slinutého karbidu

Pro obrábění Inconelu 718 slinutým karbidem, se volí typ řezného materiálu dle skupiny ISO S. Platí použití PVD povlakování nástrojů. Na základě testování čelního frézování s nástrojem, který byl vybaven vícevrstevným povlakem TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, bylo zjištěno, že životnost dosahuje až dvojnásobné hodnoty oproti nástroji bez povlaku. Tvrdá vrstva povlaku chrání substrát proti vysokým teplotám, které se při obrábění takového materiálu generují. Chrání ho také vůči abrazivnímu opotřebení a chemickým reakcím mezi substrátem a obrobkem. Použití nástrojů s povlakem a vysoce pozitivní geometrií břitu vede ke snížení řezných sil a teplot během obrábění [25,26,27].

Zvýšení řezné rychlosti vede k opotřebení břitu, vývinu tepla a k plastickým deformacím slinutého karbidu, někteří výrobci nástrojů uvádí ve svých katalozích řeznou rychlost až $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V leteckém průmyslu se nástroje ze slinutého karbidu používají pro dokončovací operace, teplota při obrábění je nižší a nedochází k tepelnému ovlivnění součásti [25,26,27].

Dalším pravidlem pro obrábění slinutým karbidem je dodržení vyšší posuvové rychlosti a odběru materiálu, a to kvůli zpevněným povrchovým vrstvám obrobku. Doporučuje se také použití chladicí emulze, pokud možno pod vysokým tlakem pro dosažení co největšího čistícího účinku. [25,26,27].

Výhody obrábění s emulzí spočívají hlavně v delší trvanlivost či životnosti rezného nástroje. Důkazem tohoto tvrzení může být experiment, jehož cílem bylo změřit silové zatížení a opotřebení VBD ze slinutého karbidu při frézování Inconelu 718 za sucha a s emulzí vedenou do řezu metodou MQCL [29].

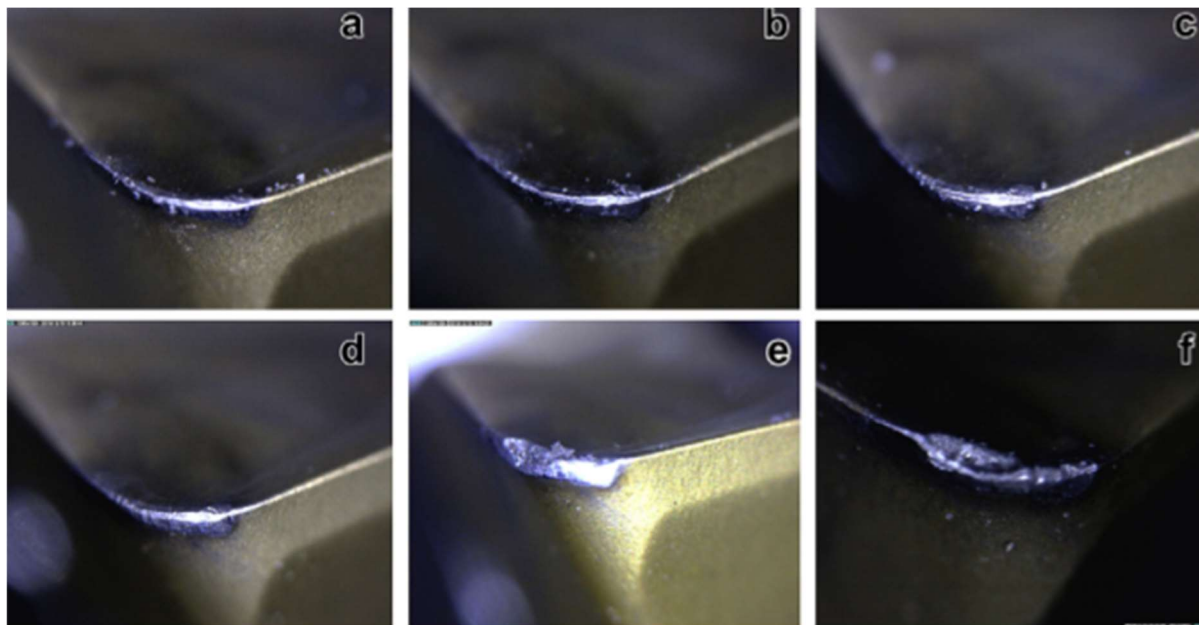
MQCL technologie funguje na principu stlačeného a podchlazeného vzduchu, který vrhá do místa řezu mazací olej ve formě aerosolu neboli v malých kapičkách rozptýlených ve stlačeném vzduchu. Při použití biologicky rozložitelného oleje je tato technologie šetrná k životnímu prostředí, šetří náklady provozovatele na likvidace nebezpečných odpadů a v neposlední řadě je šetrná vůči operátorovi výrobního stroje [29].

Měření probíhalo během sousledného frézování pomocí jedné VBD (R217.69-2020) společnosti Seco s dvouvrstvým povlakem TiAlN/TiN. Rezné podmínky byly nastaveny na $v_c = 55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $a_e = 1 \text{ mm}$. Parametry MQCL chlazení byly: tlak vzduchu 0,15 MPa, teplota vzduchu -30 °C, průtok 500 l/min a biologicky rozložitelný olej Bescut 173 o průtoku 8 ml/h [29].

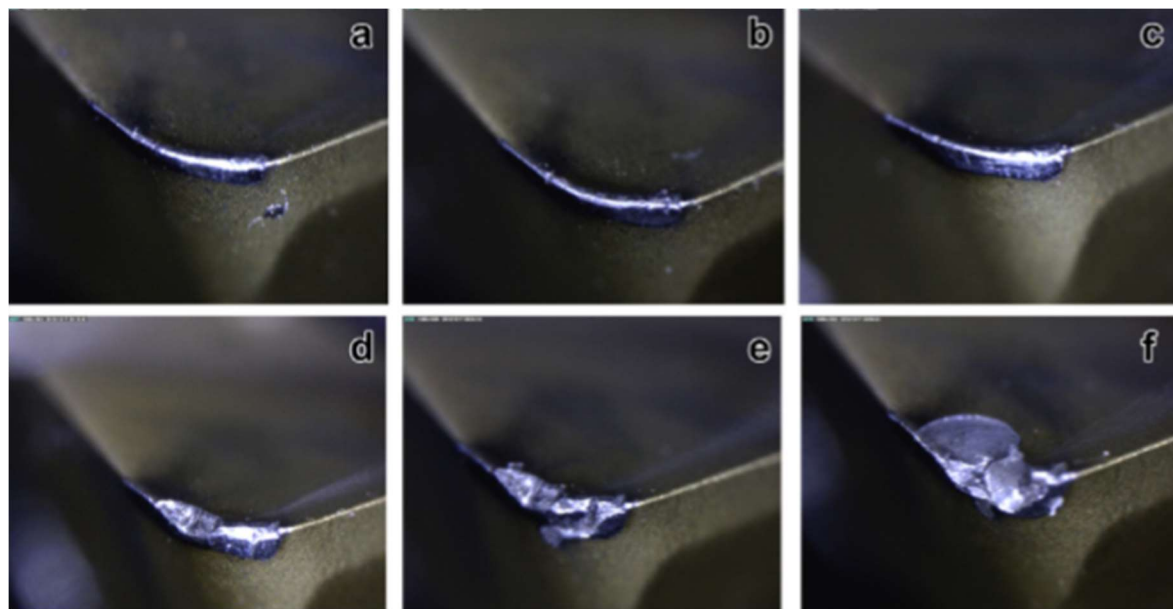
Rezné síly během experimentu nabývaly hodnot pro suché obrábění 100 až 650 N a pro chlazení metodou MQCL 30 až 300 N. Silové zatížení v ose X bylo na začátku obrábění téměř stejné pro obě metody, na konci byla z naměřených dat patrná redukce rezných sil u MQCL oproti suchému obrábění. V osách Y a Z bylo zatížení daleko menší u MQCL již od začátku experimentu. Obrábění chlazené metodou MQCL redukuje rezné síly kvůli mazání břitů kapkami biologicky rozložitelného oleje, což zmenšuje tření mezi obrobkem a rezným materiálem. K tomuto přispívá také přechlazený stlačený vzduch, který snižuje adhezi obrobku na čelo rezného nástroje [29].

Pro obě metody převládalo poškození na hřbetu VBD, tvorba nárůstku, které vedlo k vytvoření vrubu a lomu břitu. Životnost nástroje při chlazení metodou MQCL je 1,57krát delší než při suchém obrábění [29].

Vývoj opotřebení VBD ze slinutého karbidu během frézování na sucho (viz obr. 21), a při frézování které bylo chlazené metodou MQCL (viz obr. 22) [29].



Obr. 21 Opotřebení při frézování na sucho, a.) 22,1 min, b.) 24,1 min, c.) 27,5 min, d.) 29,5 min, e.) 35,5 min, f.) 42,9 min [29].



Obr. 22 Opotřebení při frézování chlazeném MQCL, a.) 20,8 min, b.) 28,8 min, c.) 44,9 min, d.) 57 min, e.) 64,3 min, f.) 72,4 min [29].

1.5.4 Frézování Inconelu 718 nástroji z řezné keramiky

Obrábění Inconelu 718 řeznou keramikou zvyšuje produktivitu práce. Tento řezný materiál je specifický svou ořezuvzdorností a odolností proti působení tepla za vysokých řezných rychlostí, což je pro tyto aplikace klíčové. Pro tento obráběný materiál se používá třída Sialon a keramika vyztužená whiskery Al_2O_3 . Bližší specifikace těchto tříd jsou uvedeny výše v kapitole 1.4.2 Řezná keramika [28].

Frézování s použitím tohoto řezného materiálu probíhá při 20 až 30x vyšších řezných rychlostech než v případě slinutého karbidu. Hodnota posuvu na zub v těchto aplikacích se pohybuje okolo 0,1 mm a řezná rychlost dosahuje 800 m.min^{-1} . Chlazení procesu probíhá pouze stlačeným vzduchem, neboť je řezná keramika vysoce citlivá na teplotní šoky v důsledku nichž, může docházet k praskání [28].

Tyto nástroje mají sklon k opotřebení ve tvaru vrubu, proto se používají destičky ve tvaru kruhu pro zajištění malých hodnot úhlu nastavení. V leteckém průmyslu se nástroje z řezné keramiky používají pro hrubovací operace, neboť mají delší životnost než nástroje ze slinutého karbidu. V tabulce 1.6 je uvedena případová studie z praxe a porovnání efektivity frézování se slinutým karbidem a řeznou keramikou [28].

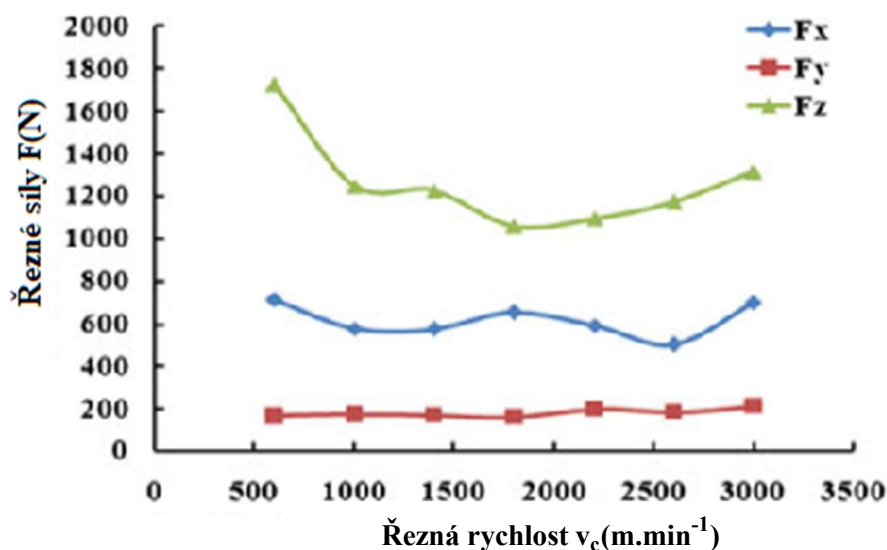
Tab. 1.6 Případová studie nahrazení řezného materiálu [28].

	$v_c [\text{m.min}^{-1}]$	$f_z [\text{mm}]$	$v_f [\text{mm.min}^{-1}]$	$a_p [\text{mm}]$	$a_e [\text{mm}]$	$Q [\text{cm}^3.\text{min}^{-1}]$
SK	38	0,71	600	0,7	46,0	19,3
Keramika	800	0,13	2000	1,5	44,1	132,3

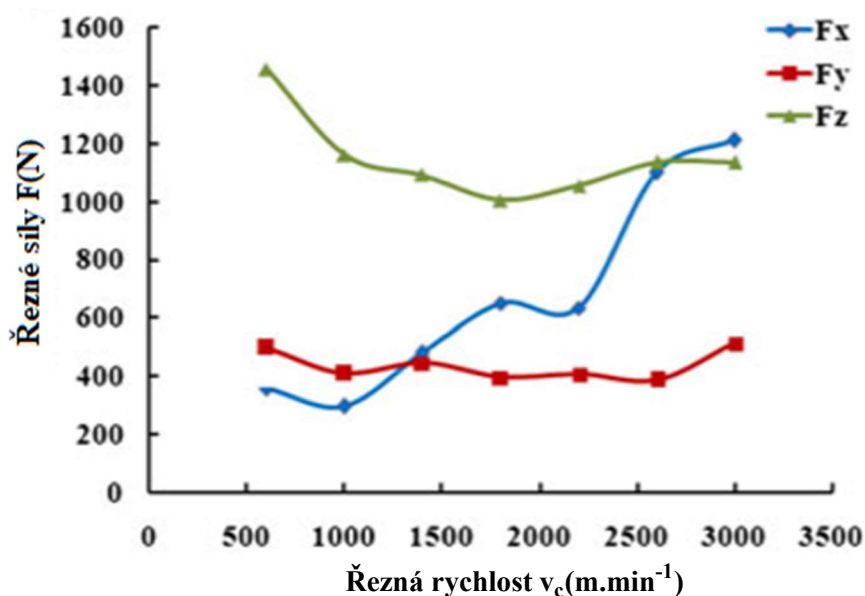
Na opotřebení nástrojů z řezné keramiky má přímý vliv řezná rychlost. To bylo dokázáno experimentem, který se zabýval měřením silového zatížení a opotřebení kruhových keramických VBD (RNGN120700E) na bázi sialonu třídy CC6060 od společnosti SANDVIK Tool Company při vysokorychlostním frézování Inconelu 718. Bylo provedeno několik řezů při hodnotách $f_z = 0,09 \text{ mm}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $a_e = 15 \text{ mm}$. Řezná rychlost nabývala 600, 1000, 1400, 1800, 2200, 2600 a 3000 m.min^{-1} . Každý test byl proveden a změřen jak při podmínkách sousledného, tak i nesousledného frézování [30].

Při řezných rychlostech 600, 1000, 1400 m.min^{-1} jsou řezné síly vyšší při sousledném frézování, během hodnot 1800, 2200, 2600 a 3000 m.min^{-1} jsou vyšší při nesousledném frézování. Nejmenší řezné síly byly naměřeny při nesousledném frézování za řezné rychlosti 1400 m.min^{-1} . Teplota během řezu při $v_c = 600 \text{ m.min}^{-1}$ dosahuje relativně malých hodnot a obrobek si udrží svoji tvrdost, opotřebení nástroje je značné a řezné síly dosahují vysokých hodnot [30].

Při zvýšení řezné rychlosti na 1000 až 2200 m.min^{-1} vzroste teplota v místě řezu na poměrně vysokou hodnotu. To vede ke zmenšení odporu materiálu a tření mezi obrobkem a nástrojem, tyto nástroje totiž pracují nejefektivněji při zvýšených teplotách. Při dalším zvýšení řezné rychlosti na 2600 až 3000 m.min^{-1} můžeme sledovat vzrůst řezných sil. Vývoj silového zatížení při sousledném frézování (viz obr. 23), při nesousledném frézování (viz obr. 24) [30].

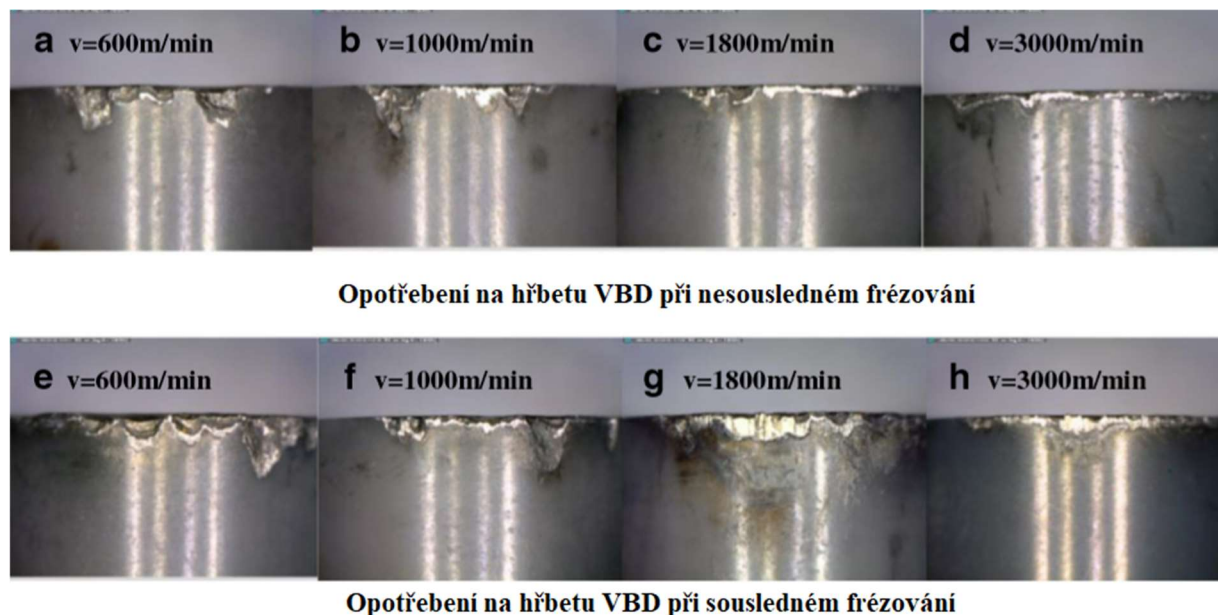


Obr. 23 Silové zatížení při sousledném frézování Inconelu 718 řeznou keramikou [30].



Obr. 24 Silové zatížení při sousledném frézování Inconelu 718 řeznou keramikou [30].

Mechanismy, kterými docházelo k opotřebení VBD, byly převážně abrazivní opotřebení na hřbetu a adhezni opotřebení ve tvaru vrubu (viz obr. 25). Při stejné řezné rychlosti bylo pozorováno větší opotřebení při sousledném frézování. Nesousledné frézování je tedy vhodnější pro vysokorychlostní frézování Inconelu 718 řeznou keramikou typu sialon, pokud je hlavním kritériem opotřebení nástroje a jeho delší životnost. Z pohledu integrity obrobeného povrchu se hodí více sousledné frézování. Při vysokorychlostním frézování Inconelu 718 sialonovou keramikou, z pohledu životnosti nástroje, je lepší udržovat řeznou rychlost nad hodnotou 1000 m.min⁻¹ [30].



Obr. 25 Opotřebení VBD z řezné keramiky typu sialon [30].

1.5.5 Frézování Inconelu 718 nástroji z PCBN

Pro obrábění Inconelu 718 se používají převážně řezné nástroje s nižším obsahem CBN. V leteckém průmyslu bývají aplikovány pro dokončovací operace. Za účelem kvalitní integrity povrchu obrobenej součásti se doporučuje použít pozitivní geometrii VBD. Povlakování přispívá k prodloužení životnosti nástroje [27].

V porovnání s řeznými nástroji z keramiky či slinutého karbidu, PCBN vykazuje nejvyšší hodnotu opotřebení na hřbetě. Chlazení procesu probíhá buď stlačeným vzduchem nebo řeznou kapalinou, nicméně ani mazání emulzí nepřispívá ke snížení hodnoty opotřebení [12].

Typické opotřebení nástrojů z PCBN během těchto aplikací bývá opotřebení na hřbetě, adhezní opotřebení ve tvaru vrubu a opotřebení na čele nástroje. Silové zatížení vzrůstá během vysokorychlostního obrábění, pokud se zvyšuje hloubka záběru a klesá se vzrůstající řeznou rychlostí [31].

Řezný nástroj je náchylnější na opotřebení a poškození při nižších řezných rychlostech. Opotřebení na hřbetě se významně sníží při použití řezné rychlosti nad $1000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Hloubka adhezního opotřebení ve tvaru vrubu se však významně nemění při změnách řezných parametrů. Pro minimální hodnoty opotřebení se doporučuje používat hloubky záběru méně než $0,5\text{ mm}$ a vyšší hodnoty posuvové rychlosti nad $0,06\text{ mm}$ na jeden zub frézy [31].

2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

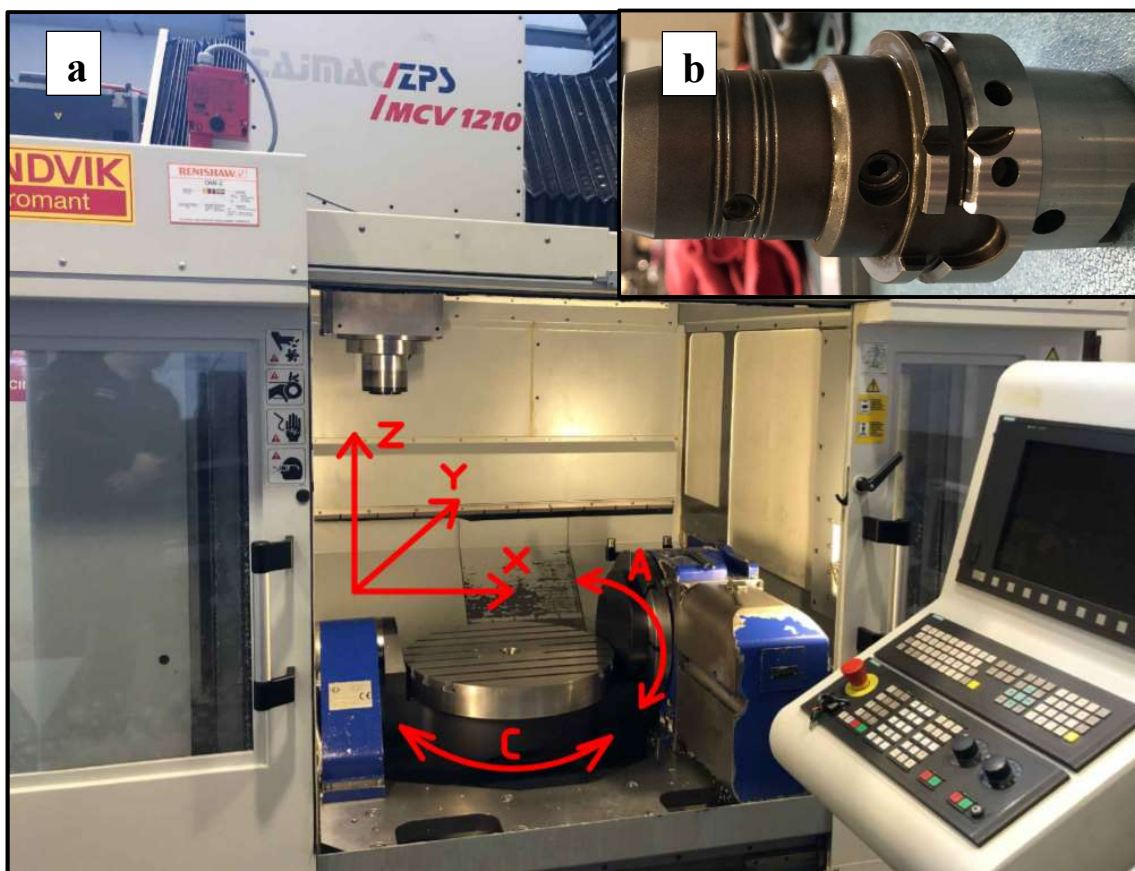
Cílem této bakalářské práce je měření silového zatížení při čelním frézování Inconelu 718 vybranými nástroji, výpočet celkové maximální zatěžující síly a sledování jejího chování v závislosti na měnící se řezné rychlosti. Toho se dosáhne pomocí měřicí aparatury, která umožní měření sil ve 3 osách během procesu obrábění v závislosti na čase. Na základě změřených hodnot bude snaha zobrazit průběh složek sil v polohách nástroje při plném záběru v materiálu, kdy řezná síla F_c [N] nabývá maximálních hodnot. Tyto polohy budou zjištěny analýzou. Na základě analýzy se budou hodnoty filtrovat od hodnot v jiných polohách nástroje.

2.1 Popis vybavení pro realizaci experimentu

Tato část práce se zabývá uvedením a popisem strojů, nástrojů a testovacích vzorků pro provedení experimentu.

2.1.1 Popis obráběcího stroje a měřicí aparatury

Frézování testovacích vzorků probíhalo na obráběcím centru MCV 1210. Tento stroj je vybaven vřetenovou jednotkou Weiss 176 s max. otáčky 18000 min^{-1} a výkonem 30/32 kW. Krouticí moment dosahuje 89,6 Nm a upínání nástrojů probíhá pomocí hydraulického upínače s kuzelem HSK63A-HC 2090 (viz obr. 26b). Stroj s řídicím systémem Sinumerik 840D pl disponuje automatickou výměnou nástrojů se zásobníkem na 30 pozic. Stroj je na obr. 26a.

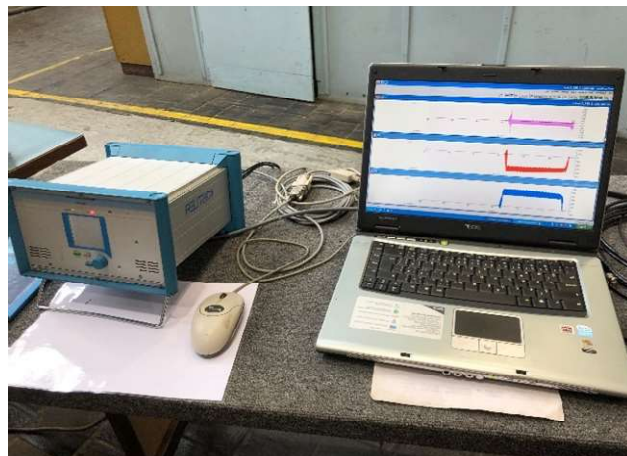


Obr. 26 Obráběcí centrum MCV 1210 v prostorách dílen Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně (a), hydraulický upínač s kuzelem HSK63A-HC 2090 (b).

Pro snímání silového zatížení v průběhu experimentu bude použit piezoelektrický dynamometr Kistler 9275B. Toto zařízení je schopné změřit 3 síly v osách X, Y, Z. Zařízení je připevněno mezi stolem frézky a strojním svěrákem pomocí šroubů (viz obr. 27). Dynamometr posílá data do počítače přes multikanálový nábojový zesilovač 5070A a A/D převodník. V počítači jsou tyto data zpracovány pomocí software DynoWare (viz obr. 28).



Obr. 27 Upnutý dynamometr na stole frézky.

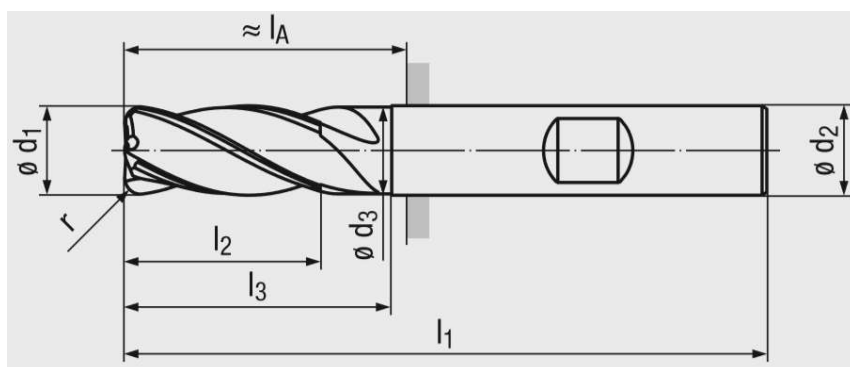


Obr. 28 Nábojový zesilovač a PC s programem Dynoware.

2.1.2 Popis řezných nástrojů

Pro experiment budou použity tři monolitní frézy ze slinutého karbidu a jedna monolitní keramická.

Nástrojem č.1 bude monolitní karbidová fréza značky Atorn s katalogovým číslem 11861107. Tento nástroj je vhodný pro hrubovací a dokončovací operace při obrábění korozivzdorných ocelí, slitin titanu a slitin na bázi niklu či kobaltu. Proměnlivé stoupání šroubovice břitů předchází vibracím a díky tomu může být dosaženo kvalitní drsnosti povrchu i při vyšších posuvových rychlostech a záběrech. Nástroj je vybaven povlakem ULTRA MS. Základní informace v tab. 2.10 dle obr. 29, zobrazena je na obrázku 32 [22].



Obr. 29 Zářez rozměrů dle tabulek 2.10 a 2.11 [23].

Tab. 2.10 Základní specifikace nástroje č.1 dle obr. 29 [22].

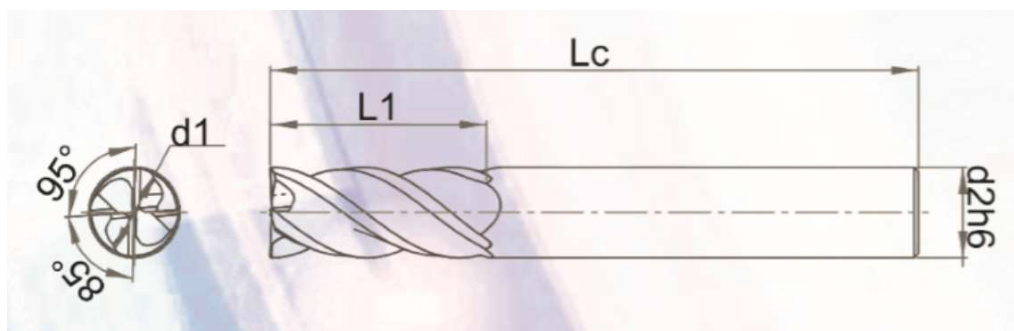
$\varnothing d_1$ [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	z [-]	r [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
5	6	4,6	4	0,3	57	13	20

Nástrojem č.2 bude monolitní karbidová fréza značky Franken TOP-Cut s katalogovým číslem 2698A.012005. Tato fréza může být využita pro obrábění téměř všech typů materiálů. Je vhodná pro dokončovací i hrubovací operace. Díky zkoseným řezným hranám a TiAlN PVD povlaku se prodlužuje životnost tohoto nástroje. Základní informace v tab. 2.11 dle obr. 29. Fréza je zobrazena na obrázku 32 [23].

Tab. 2.11 Základní specifikace nástroje č.2 dle obr. 29 [23].

$\varnothing d_1$ [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	z [-]	r [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
12	12	11,5	4	0,5	83	26	35

Nástrojem č.3 bude monolitní karbidová fréza se speciální geometrií typu SHARK společnosti Plánička tools. Fréza je vybavena PVD povlakem typu BIGAAN (AlCrBN) společnosti SHM. Tento povlak je vytvořen pomocí dvou odlišných PVD metod, magnetronvé naprašování a depozice pomocí nízkonapětového oblouku. Díky této technologii vznikl povlak s velmi hladkým povrchem. BIGAAN je určen pro širokou oblast řezných aplikací (včetně frézování Inconelu). Základní informace v tab. 2.12 dle obr. 30. Fréza je zobrazena na obrázku 32 [32].

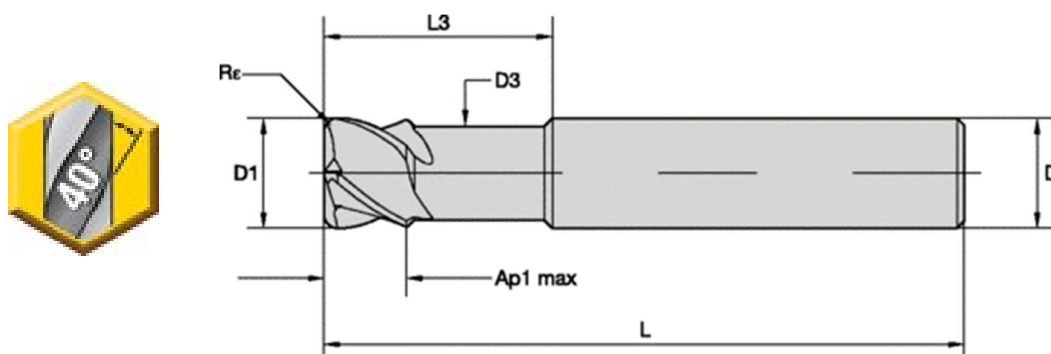


Obr. 30 Zařazení rozměrů dle tabulky 2.12 [32].

Tab. 2.12 Základní specifikace nástroje č.3 dle obr. 30 [32].

$\varnothing d_1$ [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	L_1 [mm]	L_c [mm]	z [-]
20	20	38	104	4

Nástrojem č.4 bude monolitní keramická fréza společnosti Kennametal s katalogovým číslem EADE1140A4AQJ. Tato fréza je z řezné keramiky na bázi SiAlON, konkrétně ze sorty KYS40. Tento nástroj je přímo určen pro obrábění superslitin na bázi niklu. Základní informace v tab. 2.13 dle obr. 31. Fréza je na obrázku 33 [33].



Obr. 31 Zařazení rozměrů dle tabulky 2.13 [33].

Tab. 2.13 Základní specifikace nástroje č.4 dle obr. 31 [33].

ø D1 [mm]	ø D [mm]	ø D3 [mm]	z [-]	R _ε [mm]	L [mm]	L3 [mm]	Ap1 [mm]
11,4	12	10,944	4	1,5	70	24	9



Obr. 32 Nástroj č.1, č.2, č.3.



Obr. 33 Nástroj č.4.

2.1.3 Popis testovacích vzorků obráběného materiálu

Pro experiment byly připraveny 2 testovací vzorky Inconelu 718 (viz obr. 34). Pro přípravu vzorků byla dodána plná tyč o průměru 150 mm. Materiál byl tepelně zpracován (žíhání a stárnutí) na uvedené mechanické vlastnosti v tab. 2.14, zde jsou také uvedeny rozměry testovacích vzorků.

Tab. 2.14 Charakteristika testovacích vzorků Inconelu 718 [7].

Rozměr [mm]	R_m [MPa]	R_e [MPa]	E [GPa]	Tvrlost [HRC]
100 x 100 x 23	1240	1035	206	33



Obr. 34 Testovací vzorky materiálu Inconel 718, rozměry uvedeny v [mm].

Plnou tyč bylo nutno dělit. Tato operace přípravy byla provedena ve společnosti Pilous na pásové pile ARG 300 plus S.A.F. (viz obr. 35 vlevo). Tato pila je poloautomatická s hydraulickým svěrákem i zvedáním ramene pily. Je vybavena také frekvenčním měničem pro nastavení rychlosti pilového pásu.

První řez probíhal při řezné rychlosti $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bimetalovým pásem typu M51-SPRINT-PLUS o rozměrech $27 \times 0,9 \text{ mm}$ a rozmístění zubů na pásu v poměru 3 na 4. Místo řezu bylo chlazeno olejem, pás se přehříval a byl zničen. S novým pásem se řez podařilo dokončit celkově za 1 hodinu a 25 minut.

Při druhém řezu byla řezná rychlost $16 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Byl použit pás typu BLACK-LINE-S/822 C-TEC o rozměrech $27 \times 0,9 \text{ mm}$ a rozmístění zubů 2 na 3. Tyto zuby jsou ze slinutého karbidu a jsou napájeny na pás. Chlazení probíhalo proudem emulze přímo do místa řezu.

Oproti prvnímu řezu byla posuvová rychlost vyšší. Pás se tolik nezahříval a celkově byl proces klidnější. Tríska byla článkovitá, ale ulpívala na břitech pásu, což mohlo být způsobeno typem pily bez čistících kartáčků před vodícími kostkami pásu. Tento řez trval 44 minut.

Jelikož byly plochy po řezu pilou nerovné, bylo nutno obě čelní plochy každého kusu tyče srovnat na soustruhu na rozměr 23 mm. Pro jednoduché a stabilní upnutí byly z kulatých kusů tyče vyřezány dva kvádry o rozměrech 100 x 100 mm (viz obr. 34). Testovací vzorky čtvercového průřezu byly vypáleny pomocí elektrojiskrového obrábění na stroji Mitsubishi electric (viz obr. 35 vpravo).



Obr. 35 Řez tyče na pásové pile (vlevo), řezání kvádry pomocí EDM technologie (vpravo).

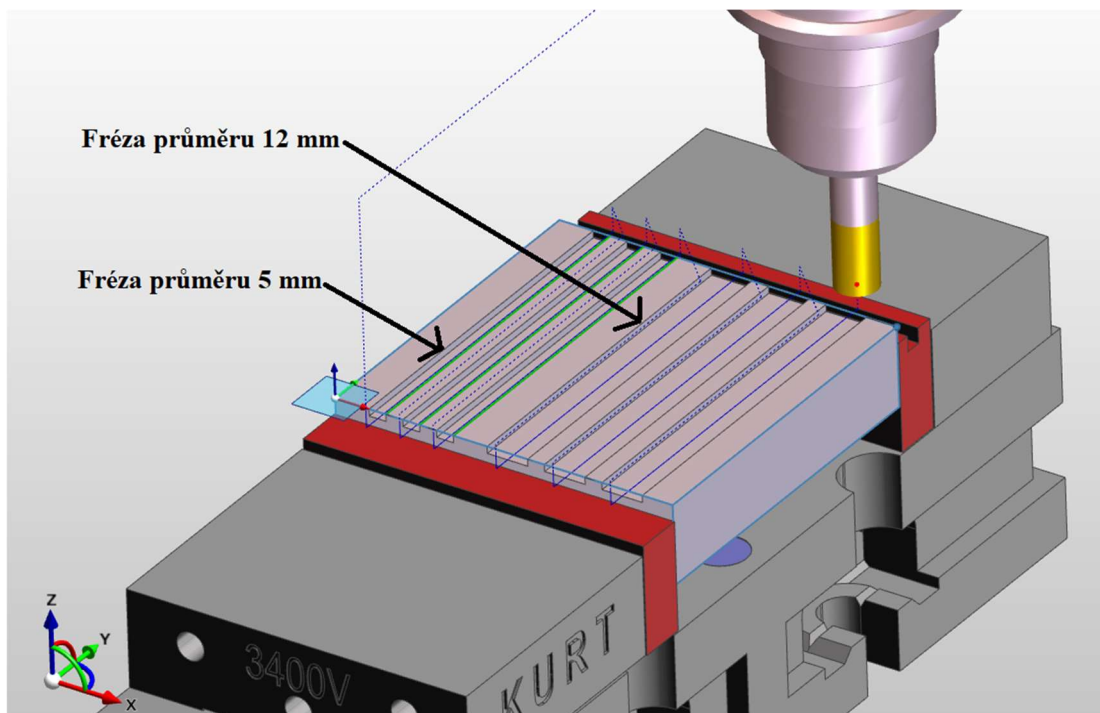
2.2 Stanovení parametrů experimentu

Obsahem této části bude navržení průběhu experimentu a výpočet potřebných parametrů k jeho provedení. Veškeré podmínky jsou stanoveny na základě katalogů od výrobce. Jelikož jsou frézy každá různého typu a průměru, nebude možné tyto nástroje nikterak porovnávat, a proto budou alespoň řezné podmínky karbidových fréz počítány dle stejných koeficientů pro stejné řezné rychlosti.

2.2.1 Průběh experimentu

S každým ze čtyř nástrojů se provedou tři řezy při různých řezných rychlostech, které odpovídají jejich minimu, maximu a střední hodnotě. Frézy o průměru 5 a 12 mm budou obrábět jednu stranu testovacího vzorku. Z druhé strany pak budou řezy vedeny frézou o průměru 20 mm. Na druhém testovacím vzorku bude změřena zbylá fréza o průměru 11,4 mm.

Pro minimalizaci vibrací fréz během řezu, byla mezi každou dráhou ponechána dostatečná mezera (5-10 mm) s plným materiálem. Programování NC kódu bude probíhat přímo na ovládacím panelu obráběcího centra. Pro vizualizaci a rozvržení drah nástrojů během experimentu byl použit CAM software Edgecam 2018 R2 (viz obr. 36).



Obr. 36 Vizualizace experimentu pro jednu stranu prvního testovacího vzorku.

2.2.2 Výpočet řezných podmínek

Pro realizaci experimentu je potřeba kromě rozvržení drah nástrojů vypočítat také řezné podmínky, které budou zadány do obráběcího centra v rámci NC kódu.

Pro každý nástroj budou stanoveny otáčky vřetene n [min^{-1}] (dle výpočtu 2.20), dosazením do vztahu 2.1, který je zmíněn výše v práci. Dále budou stanoveny parametry a_p [mm], a_e [mm], f_z [mm]. Vypočtena bude také posuvová rychlost stolu obráběcího centra v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] (dle výpočtu 2.21) ze vztahu 2.3, který je také zmíněn výše.

Pro názornost budou řezné podmínky vypočteny pro první řez nástroje č.1. Hodnoty pro další řezy ostatních nástrojů budou uvedeny v tab. 2.15.

Pro první řez nástroje č.1 bylo stanoveno $v_c = 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $a_e = 5 \text{ mm}$, $f_z = 0,01 \text{ mm}$. Nástroj č.1 má průměr 5 mm, tedy $D = 5 \text{ mm}$. Všechny nástroje mají 4 břity ($z=4$).

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} = \frac{30 \cdot 1000}{5 \cdot \pi} = 1910 \text{ min}^{-1} \quad (2.20)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,01 \cdot 4 \cdot 1910 = 76 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2.21)$$

Tab. 2.15 Řezné podmínky nástrojů pro všechny řezy.

	Řez	$v_c[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$n[\text{min}^{-1}]$	$v_f[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	$a_p[\text{mm}]$	$a_e[\text{mm}]$	$f_z[\text{mm}]$
Nástroj č.1 $z = 4$ $D = 5 \text{ mm}$	1	30	1910	76	1,0	5	0,010
	2	50	3183	127	1,0	5	0,010
	3	70	4456	178	1,0	5	0,010
Nástroj č.2 $z = 4$ $D = 12 \text{ mm}$	1	30	796	76	2,4	12	0,024
	2	50	1326	127	2,4	12	0,024
	3	70	1857	178	2,4	12	0,024
Nástroj č.3 $z = 4$ $D = 20 \text{ mm}$	1	30	478	76	4,0	20	0,040
	2	50	795	127	4,0	20	0,040
	3	70	1114	178	4,0	20	0,040
Nástroj č.4 $z = 4$ $D = 11,4 \text{ mm}$	1	400	11169	625	0,5	11,4	0,014
	2	500	13961	781	0,5	11,4	0,014
	3	625	17451	977	0,5	11,4	0,014

2.2.3 Analýza maximálního silového zatížení

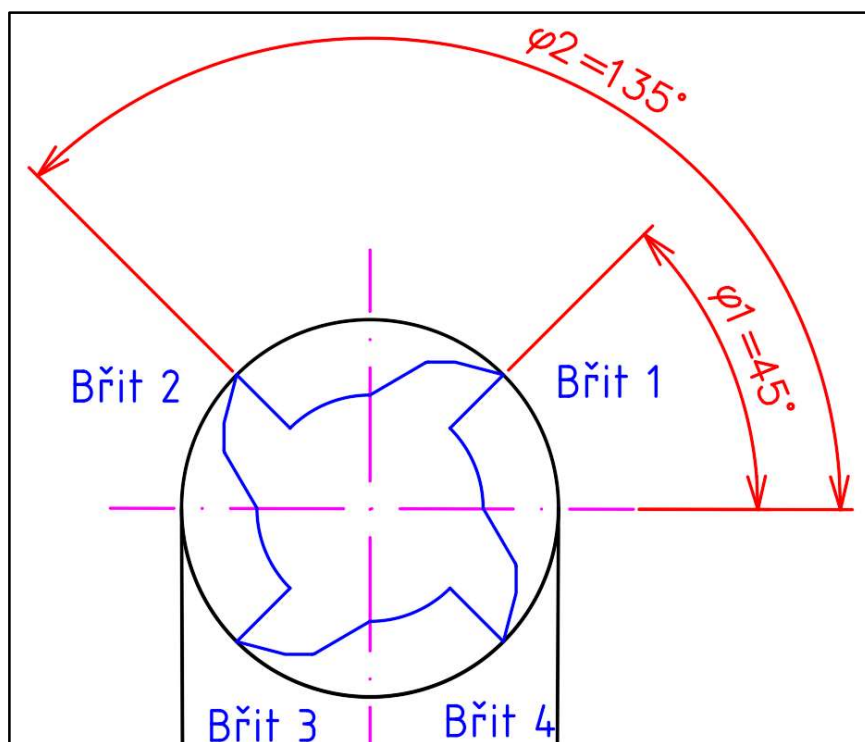
Pro přesné zobrazení průběhu silových složek při polohách s maximální řeznou silou F_c [N], je potřeba udělat jednoduchou analýzu, při kterém natočení břitů čtyřzubé frézy v plném záběru do materiálu, budou měřeny maximální hodnoty.

Ze vztahu (2.7) pro výpočet řezné síly F_c [N] je patrné, že maximální řezná síla bude v momentu, kdy dochází k oddělování maximálního průřezu třísky A_D [mm²].

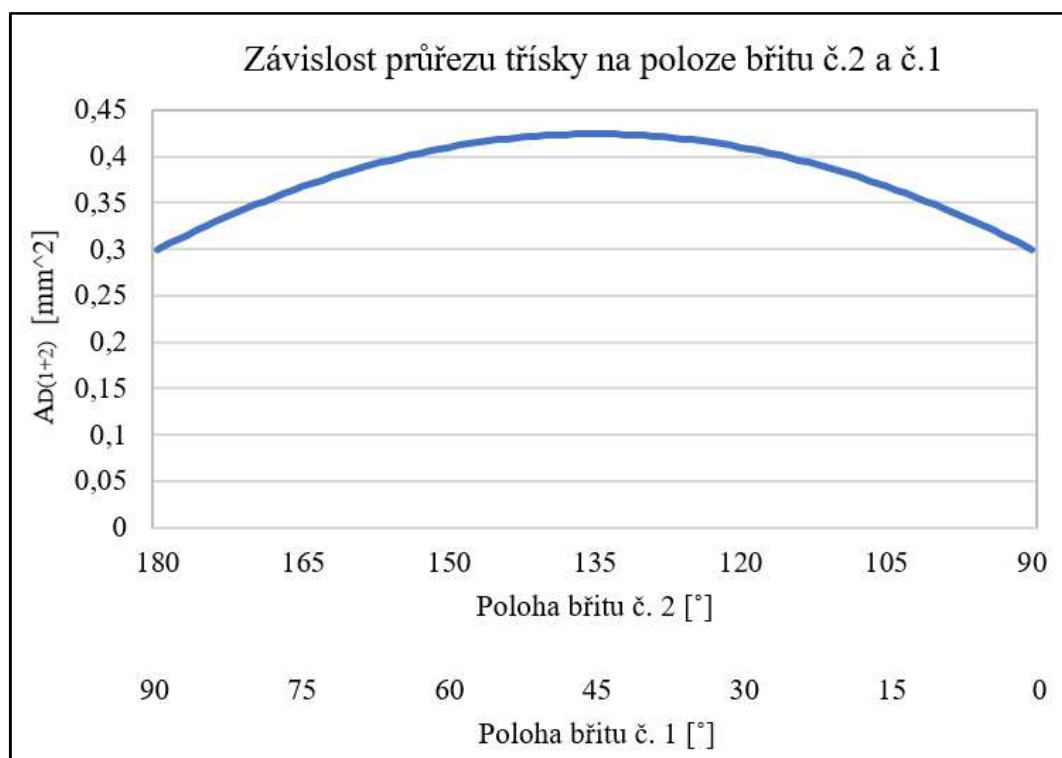
Pro názornost je uveden vztah 2.22 pro výpočet jmenovitého průřezu třísky A_D [mm²] od dvou břitů frézy v záběru. Protože jsou členy a_p [mm] a f_z [mm] konstanty, jsou dosazeny hodnoty příkladem $a_p = 3 \text{ mm}$ a $f_z = 0,1 \text{ mm}$. Jediný měnící se člen je natočení břitů frézy vůči obrobku φ_i [°].

Bude-li dosazován za φ_1 pro břit č.1 úhel od 90° do 0° a pro břit č.2 za φ_2 úhel od 180° do 90°, pak výsledný součet průřezů třísek od obou břitů je maximální, když $\varphi_1 = 45^\circ$ a $\varphi_2 = 135^\circ$ (viz obr. 37). V obrázku 38 je pro výše uvedené graf závislosti $A_{D(1+2)}$ [mm²] na poloze břitu č.1 a břitu č.2.

$$A_{D(1+2)} = b \cdot h_{(1+2)} = a_p \cdot f_z \cdot (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) \quad (2.22)$$



Obr. 37 Polohy břitů frézy při maximálním silovém zatížení.

Obr. 38 Maximální průřez třísky při poloze břitu č.2 ($\varphi_2 = 135^\circ$) a břitu č.1 ($\varphi_1 = 45^\circ$).

2.2.4 Návrh měření silového zatížení při frézování Inconelu 718

Na základě provedené analýzy je potřeba zachytit pomocí dynamometru maximální hodnoty jednotlivých složek sil během frézování, kdy bude nástroj v plném záběru do materiálu. Hodnoty při náběhu do řezu a výběhu z řezu tedy nebudou do grafů zahrnuty.

Pro stejné podmínky a jednodušší práci s datovými soubory bude nastavena vzorkovací frekvence f [Hz] pro všechny měření nástrojů dle vztahu 2.23. Při každém otočení frézy bude změřeno 16 hodnot z nichž budou právě 4 hodnoty maximální. Pro názornost budou dosazeny do vztahu pro výpočet vzorkovací frekvence hodnoty pro řez č.1 nástrojem č.1,

$$f = n \cdot z \cdot y = 31,83 \cdot 4 \cdot 4 \doteq 509 \text{ Hz} \quad (2.23)$$

kde: n [s^{-1}] – otáčky vřetene za sekundu,

z [-] – počet břitů frézy,

y [-] – počet změřených hodnot během otočení frézy o 90° .

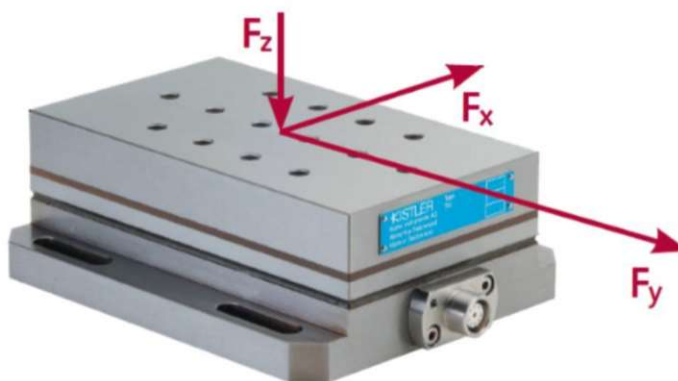
Stejným způsobem byly stanoveny i ostatní vzorkovací frekvence viz tab. 2.16. Na základě tohoto parametru a řezných podmínek budou provedeny měření.

Tab. 2.16 Vzorkovací frekvence měření nástrojů pro všechny řezy.

	Řez	n [s^{-1}]	z [-]	y [-]	f [Hz]
Nástroj č.1 D=5 mm	1	31,83	4	4	509
	2	53,05	4	4	849
	3	74,26	4	4	1188
Nástroj č.2 D=12 mm	1	13,26	4	4	212
	2	22,1	4	4	354
	3	30,95	4	4	495
Nástroj č.3 D=20 mm	1	7,96	4	4	128
	2	13,25	4	4	212
	3	18,56	4	4	297
Nástroj č.4 D=11,4 mm	1	186,15	4	4	2978
	2	232,68	4	4	3723
	3	290,85	4	4	4654

Jednotlivé složky řezných sil F_x [N], F_y [N], F_z [N], budou ukládány do datových souborů. O jejich orientaci, tedy kladné či záporné hodnotě, vypovídá obrázek 39. Dynamometr má totiž jiné rozložení souřadného systému než obráběcí centrum. Datové soubory budou obsahovat kromě zmíněných náběhových a výběhových hodnot také hodnoty, které bude potřeba filtrovat, proto se pomocí programu Microsoft Excel vyberou 4 maximální hodnoty během jednoho otočení řezného nástroje. Pomocí matematické funkce medián budou vypočteny z velkého množství maximálních hodnot pouze jediní zástupci každé silové složky F'_x [N], F'_y [N], F'_z [N]. Z nich se poté vypočte celkové silové zatížení F [N] dle vzorce 2.24.

$$F = \sqrt{F_x'^2 + F_y'^2 + F_z'^2} \quad (2.24)$$



Obr. 39 Souřadný systém dynamometru KISTLER 9275B [12].

3 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

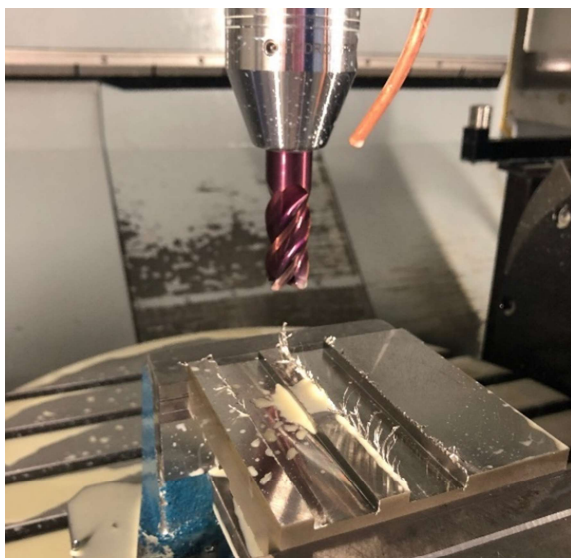
Tato část bakalářské práce se zabývá provedením navrženého měření, zpracováním datových souborů silového zatížení a konečným výpočtem celkové zatěžující síly v polohách nástroje, kdy řezná síla F_c [N] dosahuje maximálních hodnot při čelním frézování Inconelu 718.

3.1 Provedení experimentálního měření

Všechny nástroje byly upnuty do hydraulického upínače s kuželem HSK63A-HC 2090 pomocí příslušné kleštiny dle průměru stopky nástroje (viz obr. 40 a obr. 41). Testovací vzorky byly upnuty do mechanického strojního svěráku, který byl upevněn nad dynamometrem.

Před samotným frézováním proběhlo nastavení vzorkovací frekvence v softwaru Dynoware dle tab. 2.16. S každým nástrojem byly provedeny 3 řezy za stanovených řezných podmínek podle tab. 2.15. Chlazení fréz ze slinutého karbidu probíhalo řeznou kapalinou s koncentrací oleje 7,5 %. Keramická fréza byla chlazena dle doporučení výrobce stlačeným vzduchem.

Výstupem po každém řezu byly grafy složek sil F_x [N], F_y [N], F_z [N] a jejich hodnoty. Počet naměřených hodnot se lišil při každém řezu v závislosti na nastavené vzorkovací frekvenci a času měření. Měřen byl celý úsek včetně náběhu a výběhu frézy z obrobku. Tyto grafy byly ořezány a hodnoty byly exportovány a uloženy do textového souboru ke zpracování.



Obr. 40 Frézování Inconelu 718 nástrojem č.3.



Obr. 41 Frézování Inconelu 718 nástrojem č.4.

V následující kapitole budou uvedeny již zpracované datové soubory. Vždy bude uvedena tabulka se vzorkovací frekvencí měření, časem měření a počtem naměřených hodnot pro jednu osu dynamometru.

Dále budou zobrazeny grafy jednotlivých složek silového zatížení z hodnot, které byly filtrovány a vybrány jako potenciální maxima vždy z jednoho otočení frézy. V grafech nebudou zobrazeny náběhy a výběhy nástroje. Časová osa tedy nebude začínat od nuly,

ale od okamžiku, kdy byla fréza skutečně v plném záběru. Do tabulky budou také zaneseny mediány z maxim jednotlivých silových složek, a také vypočítaný medián celkového maximálního silového zatížení.

3.2 Zpracování datových souborů z měření

V této kapitole budou prezentovány zpracované hodnoty v tabulkách a grafech pro každý nástroj zvlášť. Grafy uvádí závislost maximálních hodnot silových složek během jednoho otočení frézy na čase. Pomocí softwaru Microsoft Excel a matematické funkce medián byly vytvořeny z velkého počtu maximálních hodnot jejich zástupci F'_x [N], F'_y [N] a F'_z [N]. Toho bylo docíleno pomocí vytvořeného makra, které uvádí příloha 1 této bakalářské práce.

Pomocí těchto zástupců a vztahu 2.24, který je uvedený výše v práci, byly vypočteny mediány celkového maximálního silového zatížení F [N]. Tyto hodnoty se nacházejí v následujících tabulkách 3.10, 3.11, 3.12, 3.13.

Tab. 3.10 Vstupní a výstupní hodnoty z měření nástroje č.1.

	Řez č.	f [Hz]	t [s]	Poč. hodnot	F'_x [N]	F'_y [N]	F'_z [N]	F [N]
Nástroj č.1 D = 5 mm	1	509	110	55991	127,3	-132,2	2,1	183,5
	2	849	90	76411	133,9	-167,9	4,9	241,8
	3	1188	70	83161	179,9	-554,7	17,5	583,4

Tab. 3.11 Vstupní a výstupní hodnoty z měření nástroje č.2.

	Řez č.	f [Hz]	t [s]	Poč. hodnot	F'_x [N]	F'_y [N]	F'_z [N]	F [N]
Nástroj č.2 D = 12 mm	1	212	120	25441	482,1	-384,3	-26,1	617,1
	2	354	120	42481	469,8	-433,5	-22	639,6
	3	495	60	29701	501,4	-503,7	-17	710,9

Tab. 3.12 Vstupní a výstupní hodnoty z měření nástroje č.3.

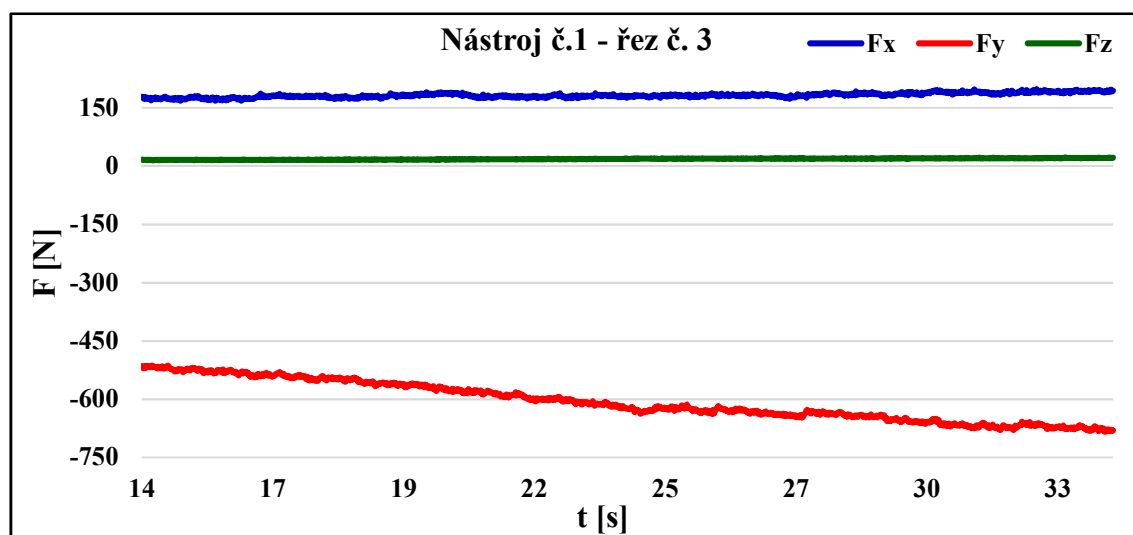
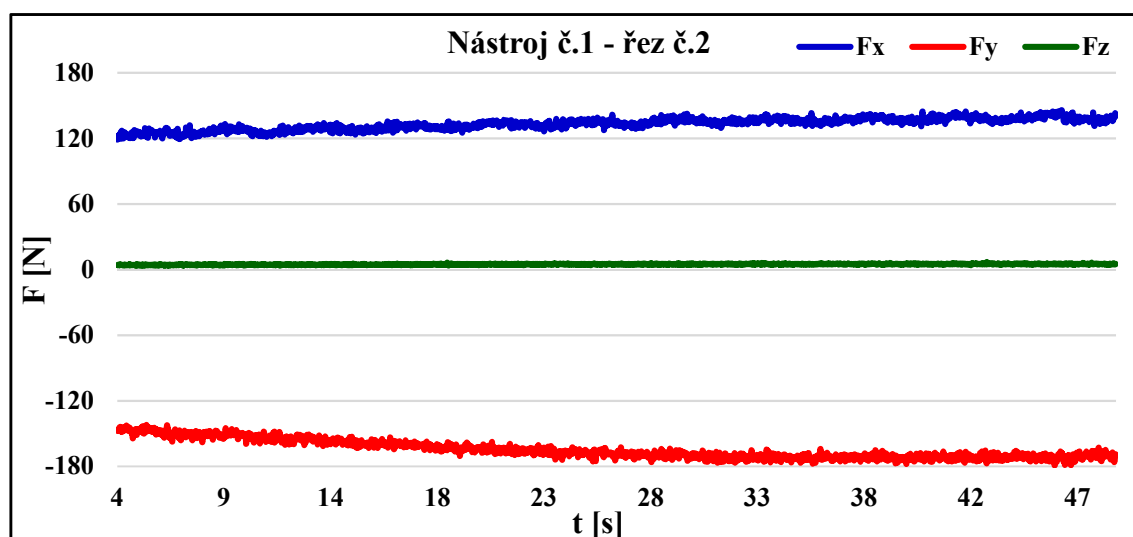
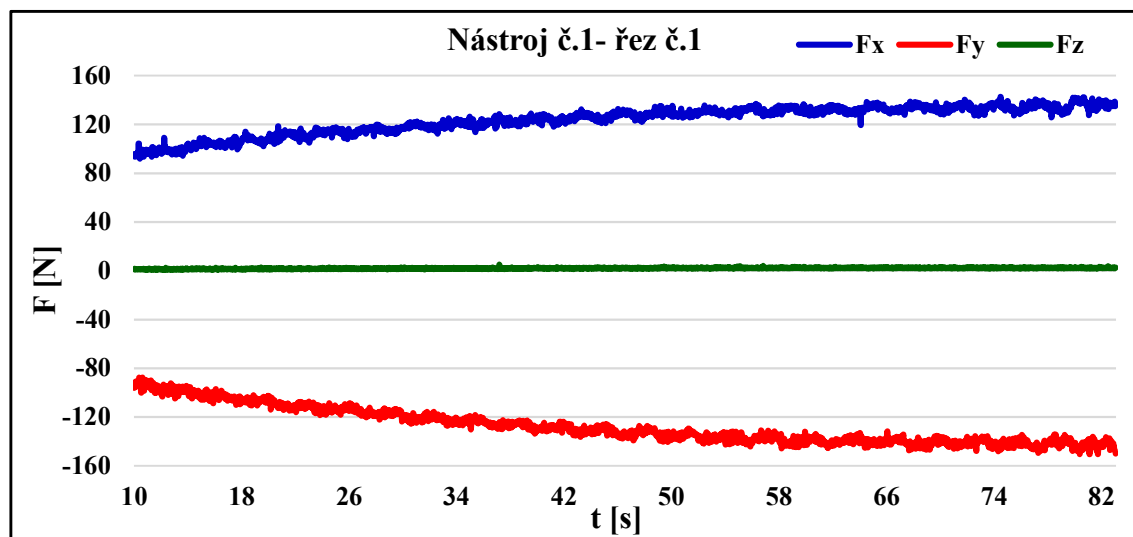
	Řez č.	f [Hz]	t [s]	Poč. hodnot	F'_x [N]	F'_y [N]	F'_z [N]	F [N]
Nástroj č.3 D = 20 mm	1	128	120	15361	999,1	-750,3	-18,2	1249,6
	2	212	110	23321	1186,1	-1154,8	-21,8	1655,6
	3	297	70	20791	1313,9	-1914,4	-28,4	2322,1

Tab. 3.13 Vstupní a výstupní hodnoty z měření nástroje č.4.

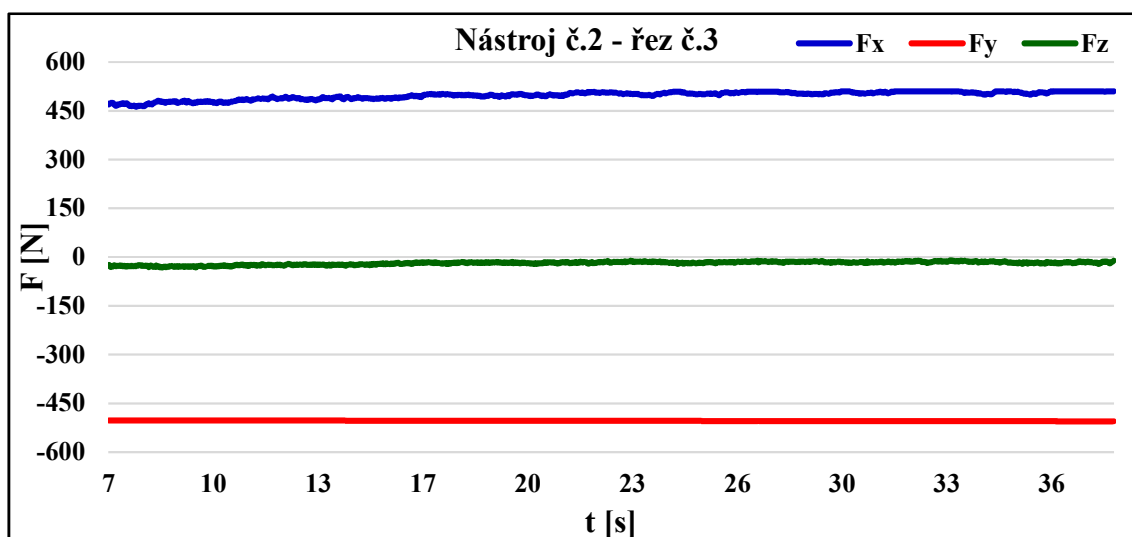
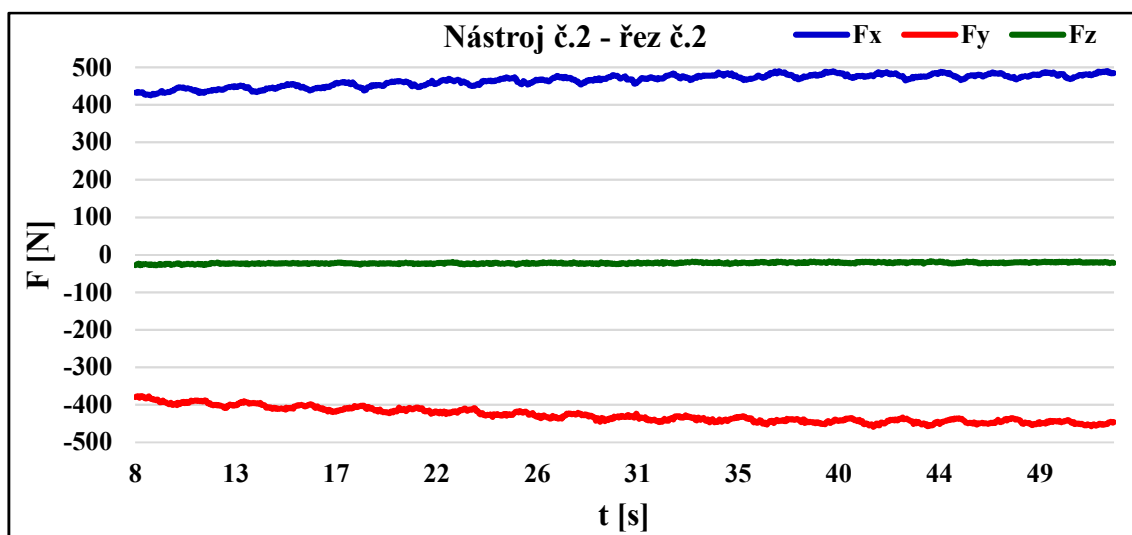
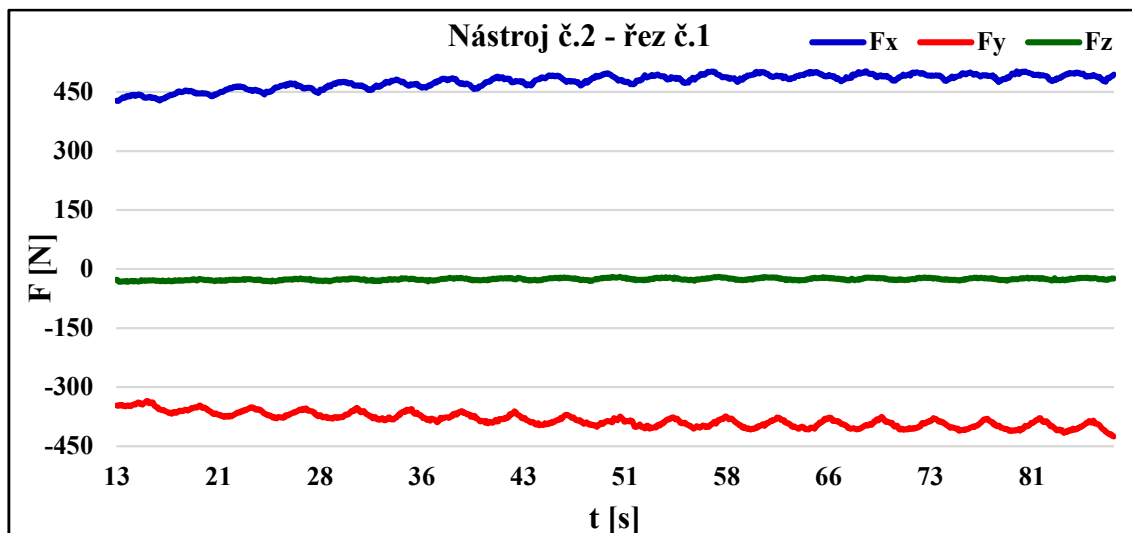
	Řez č.	f [Hz]	t [s]	Poč. hodnot	F'_x [N]	F'_y [N]	F'_z [N]	F [N]
Nástroj č.4 D = 11,4 mm	1	2978	40	119121	78,3	-120,2	27,3	146
	2	3723	40	148921	71,2	-144,9	32	164,6
	3	4654	20	93081	63,6	-131,8	31,4	149,7

Co se týče opotřebení nástrojů po provedení měření, tohle zkoumání není přímo předmětem práce. Po důkladné rešerši bylo očekáváno značné opotřebení i po tak krátkých operacích, a proto je v příloze 2 uvedena fotodokumentace stavu nástrojů po experimentu. Na následujících stranách jsou uvedeny zmiňované grafy maximálního silového zatížení.

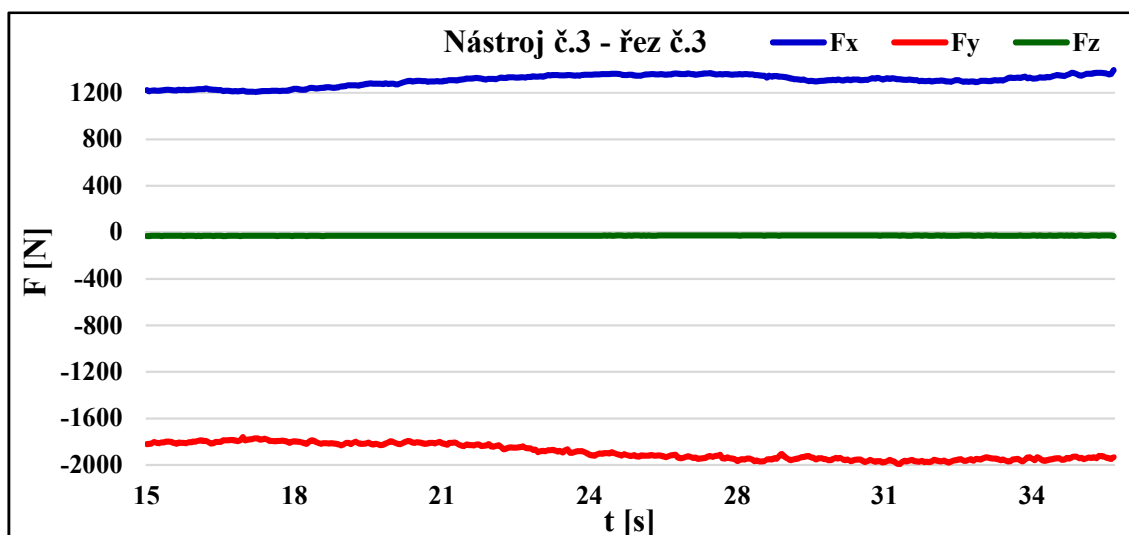
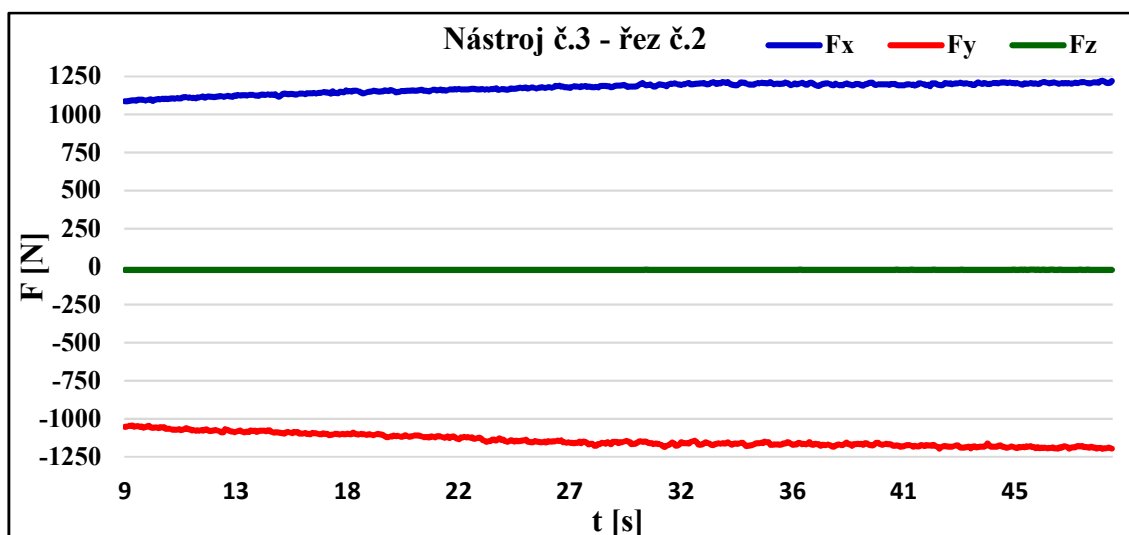
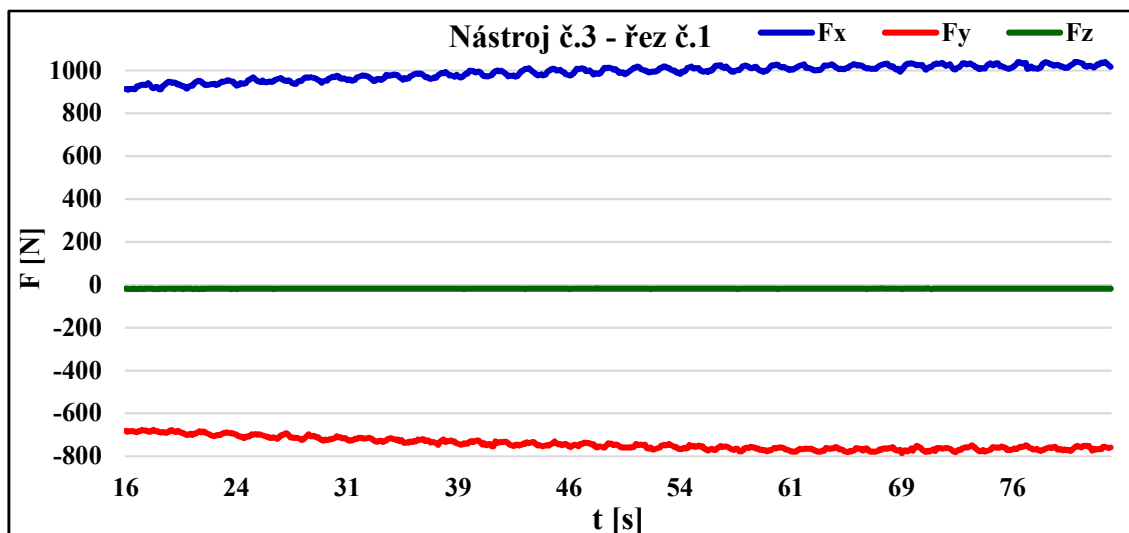
Zde jsou uvedeny grafy složek silového zatížení v momentech, kdy F_c [N] nabývá maximálních hodnot v operacích, které byly provedeny nástrojem č.1.



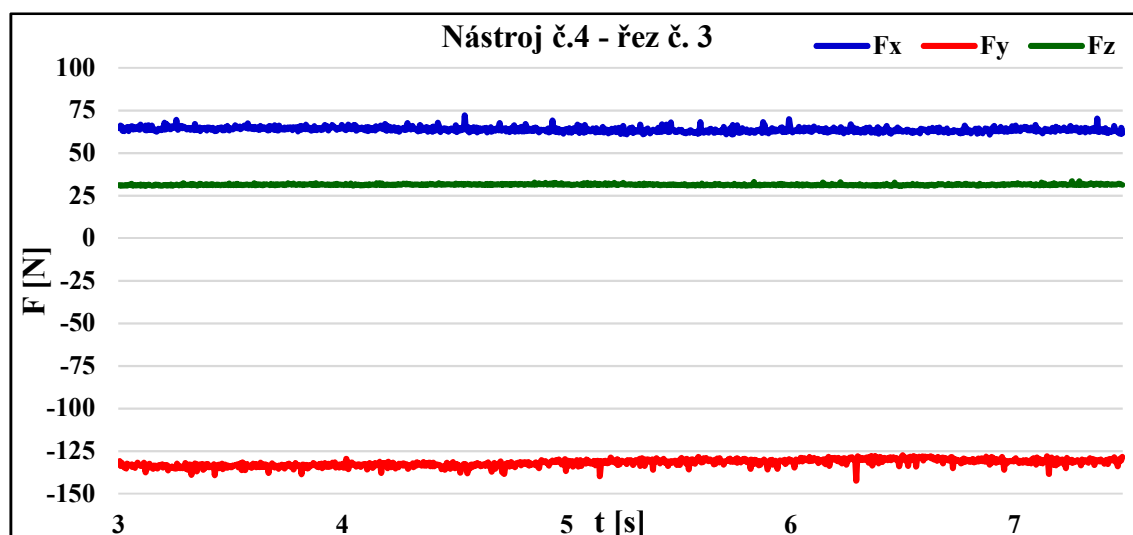
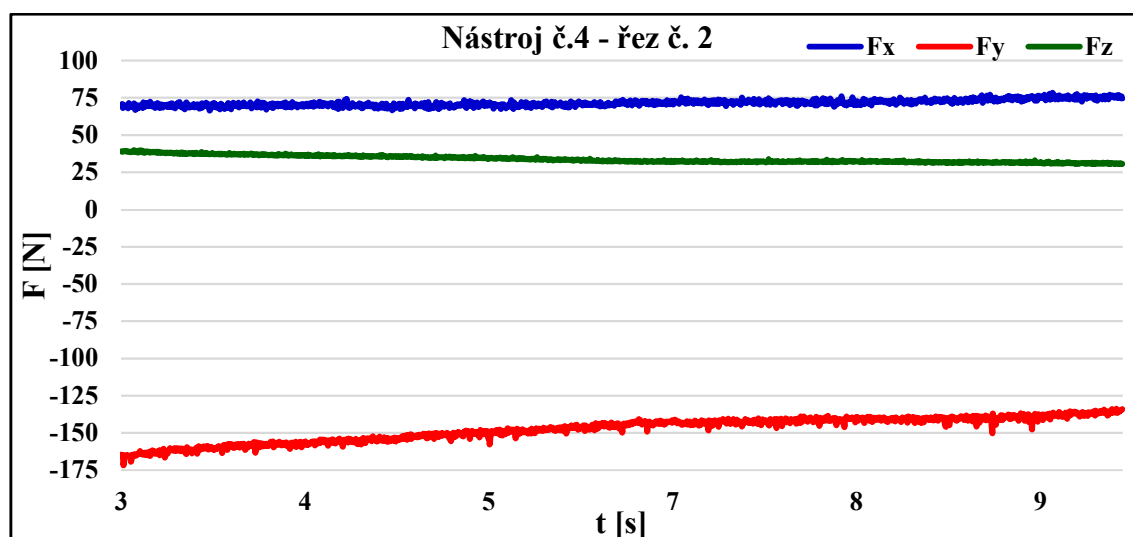
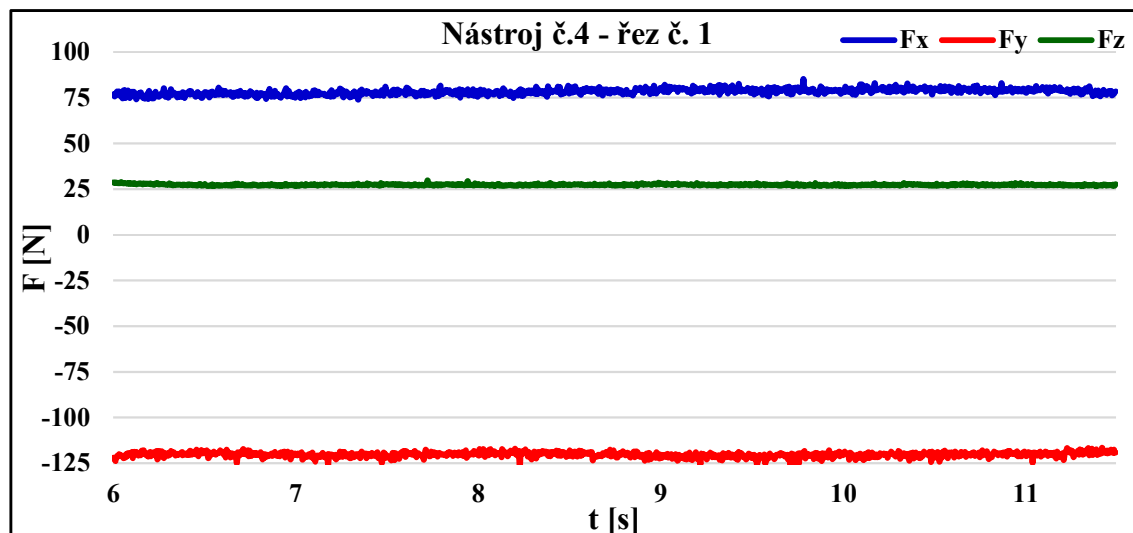
Zde jsou uvedeny grafy složek silového zatížení v momentech, kdy F_c [N] nabývá maximálních hodnot v operacích, které byly provedeny nástrojem č.2.



Zde jsou uvedeny grafy složek silového zatížení v momentech, kdy F_c [N] nabývá maximálních hodnot v operacích, které byly provedeny nástrojem č.3.



Zde jsou uvedeny grafy složek silového zatížení v momentech, kdy F_c [N] nabývá maximálních hodnot v operacích, které byly provedeny nástrojem č.4.

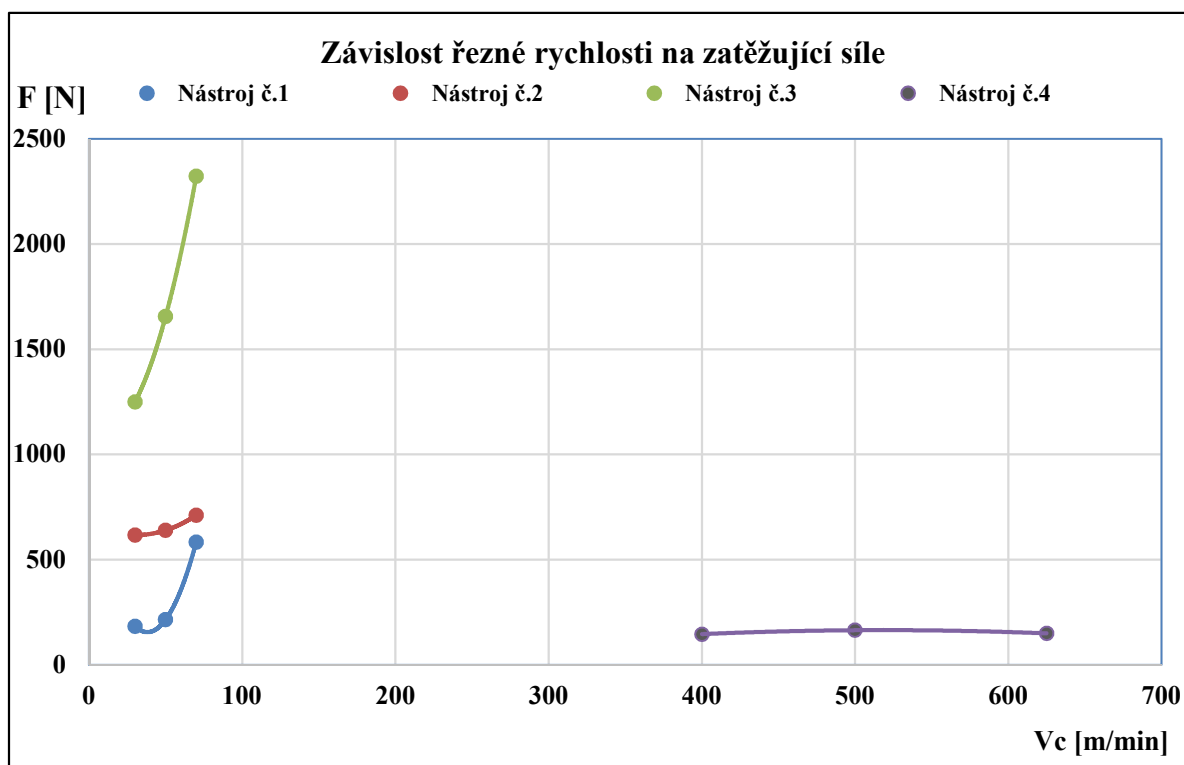


4 DISKUZE

Na základě rešerše zkušeností s obráběním Inconelu 718 nástroji ze slinutého karbidu se očekávalo zvýšení řezných sil v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti. Příčinou je vzrůstající teplota v místě řezu díky nízké tepelné vodivosti tohoto materiálu. To bylo dokázáno dle obrázku 42 níže.

Razantní nárůst řezných sil u těchto nástrojů, je způsoben také velkým opotřebením povlaku již po prvních řezech, ten pak dostatečně nechránil substrát před vysokými teplotami. Sledován byl také proces tvorby nárůstku na břitech nástrojů. Převažující poškození u všech nástrojů bylo vylamování ostří v důsledku oddělování vytvořeného nárůstku na břitech nástrojů, tepelné trhliny, abraze na hřbetech břitů a opotřebení ve tvaru vrubu. Opotřebení těchto fréz uvádí příloha 2.

Při řezech keramickou frézou byl očekáván spíše pokles zatěžujících sil, jelikož tyto nástroje pracují efektivně za vysokých teplot a řezných rychlostí. Dle zmíněné rešerše se pokles zatěžujících sil ustálí mezi hodnotami $v_c = 1000$ až $2200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Takových hodnot řezné rychlosti nebylo dosaženo z důvodu limitujících otáček vřetene obráběcího centra. Vývoj zatěžující síly při frézování nástrojem č.4 je na obrázku 42. Opotřebení této frézy uvádí příloha 2.



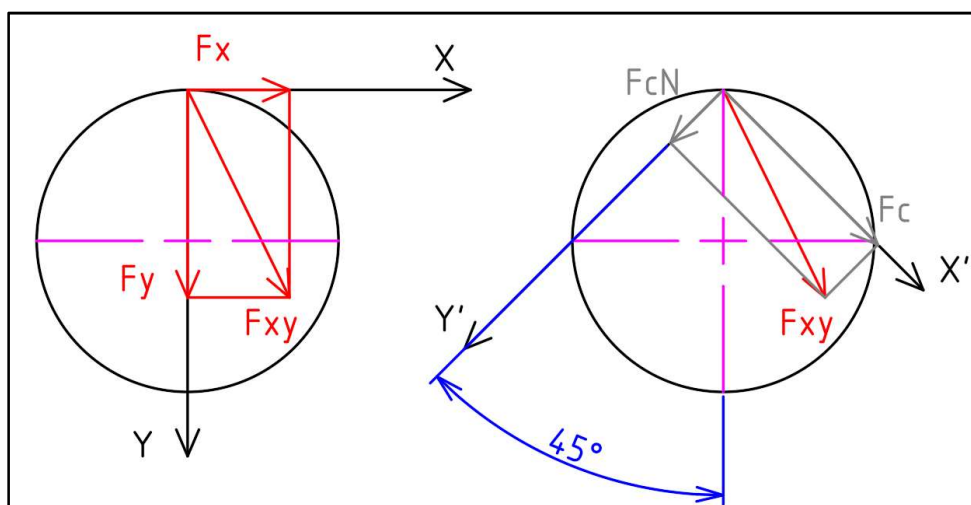
Obr. 42 Zhodnocení nástrojů pomocí závislosti řezné rychlosti na mediánech maximálních zatěžujících sil.

4.1 Návrhy pokračování řešení

Měření experimentu obsahovalo obrovské množství dat z důvodu velkých rozměrů testovacích vzorků. Optimalizace experimentu spočívá ve zmenšení testovacích vzorků, tím se zmenší doba řezu, a naopak se může nastavit vyšší vzorkovací frekvence dynamometru. To zajistí vyšší přesnost zachycení potenciálních maximálních hodnot zatěžujících silových složek.

Jelikož byly pro experiment k dispozici nástroje různých rozměrů a různého typu, není zcela relevantní porovnávání těchto nástrojů. Nicméně jako prokázání teoretických znalostí, které byly načerpány z rešerše o obrábění Inconelu 718, je takovéto vyhodnocení dostačující.

Naměřené a již zpracované hodnoty se dají dále využít například pro stanovení maximální řezné síly F_c [N], měrné řezné síly k_c [N·mm⁻²] či užitečného řezného výkonu P_c [kW]. Tyto parametry se dají vypočítat na základě vztahů, které jsou uvedeny v kapitole 1.5.1 a také na základě grafického stanovení řezné síly F_c [N] vztaženou na jeden břit nástroje (viz obr. 43). Zpracované mediány silových složek je nutno kvůli dvěma zubům v záběru vydělit dvěma, vektorově složit a v pootočeném souřadném systému o úhel 45° rozložit na složky F_c [N] a F_{cN} [N].



Obr. 43 Stanovení řezné síly F_c [N] ze silového obrazce.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce na téma *Obrábění Inconelu 718 pro aplikace v leteckém průmyslu* byla literární studie superslitin niklu se zaměřením na zkušenosti s obráběním Inconelu 718 a sledování závislosti zatěžující síly na řezné rychlosti při frézování tohoto materiálu nástroji ze slinutého karbidu a řezné keramiky.

To bylo provedeno navrženým experimentálním měřením silového zatížení během frézování připravených testovacích vzorků při měnící se řezné rychlosti. Na základě teoretických znalostí nabytých během rešerše literatury byly některé poznatky potvrzeny.

Hlavními výstupy této práce jsou:

- nasazení řezné keramiky pro obrábění Inconelu 718 pro aplikace v leteckém průmyslu je i s ohledem na vyšší cenu nástrojů efektivní řešení pro hrubovací operace,
- v případě dokončovacích operací je vhodné použít nástroje ze slinutého karbidu s ohledem na nežádoucí tepelné ovlivnění součásti, které nastává při frézování řeznou keramikou,
- silové zatížení během frézování nástroji ze slinutého karbidu rostlo se zvyšující se řeznou rychlostí, to mohlo být způsobeno značným opotřebením nástroje již po prvním řezu,
- naopak při vysokých pracovních teplotách si obrobek neudrží svoji tvrdost, a proto při frézování Inconelu 718 nástrojem z řezné keramiky začalo silové zatížení klesat v intervalu řezné rychlosti 500 až 625 m.min⁻¹ užitě během experimentu,
- převažujícím poškozením nástrojů byly teplené trhliny, vylamování ostří v důsledku oddělování vytvořeného nárůstku na břitu nástroje a adhezní opotřebení ve tvaru vrubu v úrovni hloubky řezu,
- přítomností tvrdých karbidických částic v obráběném materiálu bylo způsobeno také abrazivní opotřebení na hřbetech jednotlivých břitů nástrojů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MOURITZ, P. A. Introduction to aerospace materials. Oxford u.a: Woodhead Publ. Limited, 2012. ISBN 978-085-7095-152.
2. Campbell, F.C.. (2006). Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials - 6.2.2 Iron-Nickel Based Superalloys. Elsevier. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009XEDF4/manufacturing-technology/iron-nickel-based-superalloys>
3. PTÁČEK, Luděk, Jaroslav CIHLÁŘ, Eduard DORAZIL, Rudolf FORET, Bohumil PACAL, Josef STEIDL, Jaroslav ŠENBERGER a Jiří ŠVEJCAR. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
4. SMÉKALOVÁ, J. *Vztah mezi stukturou a vlastnostmi litých niklových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 37 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.
5. LOSERTO VÁ, Monika. *PROGRESIVNÍ MATERIÁLY* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf>. Učební text. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
6. Bibus s.r.o. *Niklové slitiny* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: https://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf
7. High Performance Alloys Literature. *Special Metals* [online]. New York: Special Metals Corporation, c2017 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
8. GE Aviation. *Pouhé dva roky od zahájení vývoje hlásí GE Aviation první start ATP motoru* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: https://www.geturboprops.com/cz/pro-media/tiskove-zpravy/detail/130_336-pouhe-dva-roky-od-zahajeni-vyvoje-hlasi-ge-aviation-prvni-start-atp-motoru
9. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
10. Sandvik Coromant. *Skupiny obráběných materiálů* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>

11. Sandvik Coromant. *Nástrojové materiály* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-07-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
12. VARHANÍK, M. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..
13. Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge. *Příručka obrábění*. Cross Media Solutions GmbH, Würzburg, 2016, 561 s. ISBN 978-3-9818286-2-7
14. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. Část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT – FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 s. [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
15. KELLNER, Tomas. GE reports. *Next-Generation Cessna Denali Will Have A 3D-Printed Turboprop Engine* [online]. 2016 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/brand-new-cessna-denali-will-have-a-3d-printed-propeller-engine/>
16. Grzesik, Wit. (2008). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials - Theory, Modelling and Applications*. Elsevier. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAMPMMTM1/advanced-machining-processes/advanced-machining-processes>
17. MM Průmyslové spektrum. *Moderní povlakovací zařízení* [online]. 2012-05-15 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-povlakovaci-zarizeni.html>
18. Sandvik Coromant. *Opotřebení břitů* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
19. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. : il., tabulky, grafy, schémata. ISBN 80-214-3068-0.
20. FIALA, Zdeněk. *ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PRO NOVÉ OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY A CNC TECHNOLOGIE* [online]. 2014-04-16 [cit. 2019-03-23]. ISSN 1213-4198. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-5000-4.pdf>

21. Sandvik Coromant. *Výpočtové vztahy a definice pro frézování* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
22. HAHN+KOLB Werkzeuge GmbH. *ATORN SC HPC torus milling cutter, Ø 5.0 x 13 x 20 x 57 mm* [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.hahn-kolb.de/ATORN-SC-HPC-torus-milling-cutter-50-x-13-x-20-x-57-mm-HA-shaft-r03-mm/16672214.sku/en/US/EUR/>
23. EMUGE Corp. *HIGH PERFORMANCE END MILLS*, c2015 [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://ahbinc.com/home/jail/home/ahb/images/pdf/AHB%20-%20Cutting%20Tools/Emuge%20High%20Performance%20End%20Mill%20Catalog.pdf>
24. Gupta Kapil *Advanced Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-56099-1. ISBN 978-3-319-56098-4.
25. KURSUNCU, Bilal, Halil CALISKAN, Sevki yilmaz GUVEN a Peter PANJAN. Wear Behavior of Multilayer Nanocomposite TiAlSiN/TiSiN/TiAlN Coated Carbide Cutting Tool during Face Milling of Inconel 718 Superalloy. *Journal of Nano Research* [online]. Trans Tech Publications, 2017, 47, 11-16 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JNanoR.47.11. ISSN 1662-5250.
26. Rose Bauer. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů* [online]. 2008 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabení-tezkoobrobitelných-materialů.html>
27. Kennametal. *High-Temperature Machining Guide* [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/SuperAlloys_material_machining_guide_Aerospace.pdf
28. AB Sandvik Coromant. *Řezná keramika: Moderní a produktivní způsob obrábění žárovzdorných slitin* [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.pdf>
29. ZHANG, S., J.f. LI a Y.w. WANG. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2012, 32, 81-87 [cit. 2019-04-11]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.014. ISSN 0959-6526.

30. TIAN, Xianhua, Jun ZHAO, Jiabang ZHAO, Zhaochao GONG a Ying DONG. Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools.(Report). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. Springer, 2013, 69(9-12), 2669 [cit. 2019-04-11]. DOI: 10.1007/s00170-013-5206-4. ISSN 0268-3768.

31. ZHANG, Y. l., J. f. SUN, X. SHEN a W. y. CHEN. Performance of PCBN tools in high-speed milling nickel-based superalloy. Materials Research Innovations [online]. Taylor & Francis, 2015, 19(S1), 1-1 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001381. ISSN 1432-8917.

32. Plánička TOOLS s.r.o. *Katalog 2018* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z:
<http://www.planickanastroje.cz/web/viewer.html?file=%2F../files/katalog.pdf>

33. Kennametal. *High-Performance Solid Ceramic End Mills • EADE* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z:
<https://www.kennametal.com/hi/products/20478624/57493250/1522849/100121201/100121214/100121239/100003329.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
CBN	Kubický nitrid boru
CVD	Chemical Vapour Deposition
HB	Tvrдость dle Brinella
HiPIMS	High Power Impulse Magnetron Sputtering
HRC	Tvrдость dle Rockwella
HV	Tvrдость dle Vickerse
MQCL	Minimum quantity of cooling lubrication
PCBN	Polykrystalický kubický nitrid boru
PVD	Physical Vapour Deposition
SK	Slinutý karbid
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
a_e	[mm]	radiální hloubka řezu
b	[mm]	jmenovitá šířka třísky
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
f	[Hz]	vzorkovací frekvence
f_n	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	tloušťka odebírané třísky
n	[min ⁻¹]	otáčky
Q	[cm ³ .min ⁻¹]	rychlost úběru materiálu
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Makro v programu MS Excel pro zpracování naměřených hodnot.
Příloha 2 Fotodokumentace opotřebení všech nástrojů.

PŘÍLOHA 1

Sub Makro1()

' Makro1 Makro

' konec = ČÍSLO POSLEDNÍHO ŘÁDKU

konec = 11669

' VYNULOVÁNÍ SLOUPCŮ PROTŘÍDĚNÍ

Range("C" & 22, "J" & konec).ClearContents

Range("M" & 22, "T" & konec).ClearContents

Range("W" & 22, "AD" & konec).ClearContents

' URČENÍ POČTU NAMĚŘENÝCH HODNOT A POLARITY HODNOT VE STŘEDU MĚŘENÍ

' ROZHODNUTÍ, ZDA BUDOU AKCEPTOVÁNY HODNOTY MÍNUS NEBO PLUS

' U Kladných hodnot os použít příkaz LARGE

' U záporných hodnot os použít příkaz SMALL

pocetciselx = Application.Count(Range("B" & 22, "B" & konec))

polovinax = pocetciselx / 2

If Cells(polovinax, 2) < 0 **Then** polaritax = "Small" **Else** polaritax = "Large"

pocetcisely = Application.Count(Range("L" & 22, "L" & konec))

polovinay = pocetcisely / 2

If Cells(polovinay, 12) < 0 **Then** polaritay = "Small" **Else** polaritay = "Large"

pocetciselz = Application.Count(Range("V" & 22, "V" & konec))

polovinaz = pocetciselz / 2

If Cells(polovinaz, 22) < 0 **Then** polaritaz = "Small" **Else** polaritaz = "Large"

' VÝBĚR DAT DLE POLARITY HODNOTY VE STŘEDU MĚŘENÍ - OSA X

For n = 22 **To** konec

If polaritax = "Large" **And** Cells(n, 2) > 0 **Then** Cells(n, 3) = Cells(n, 2)

If polaritax = "Small" **And** Cells(n, 2) < 0 **Then** Cells(n, 3) = Cells(n, 2)

Next n

' VÝBĚR DAT DLE POLARITY HODNOTY VE STŘEDU MĚŘENÍ - OSA Y

For n = 22 **To** konec

If polaritay = "Large" **And** Cells(n, 12) > 0 **Then** Cells(n, 13) = Cells(n, 12)

If polaritay = "Small" **And** Cells(n, 12) < 0 **Then** Cells(n, 13) = Cells(n, 12)

Next n

' VÝBĚR DAT DLE POLARITY HODNOTY VE STŘEDU MĚŘENÍ - OSA Z

For n = 22 **To** konec

If polaritaz = "Large" **And** Cells(n, 22) > 0 **Then** Cells(n, 23) = Cells(n, 22)

If polaritaz = "Small" **And** Cells(n, 22) < 0 **Then** Cells(n, 23) = Cells(n, 22)

Next n

' PŘÍRAZENÍ POŘADÍ K NAMĚŘENÉ HODNOTĚ - osa X,Y,Z

For n = 22 **To** konec **Step** 16

For m = 0 **To** 15

Cells(m + n, 4) = m + 1

Cells(m + n, 14) = m + 1

Cells(m + n, 24) = m + 1

Next m

Next n

' ČÍSLOVÁNÍ SLOUPCŮ 10, 20, 30 - PŘÍPRAVA SETŘÍDĚNÍ

a = 0

For n = 22 **To** konec **Step** 16

Cells(n, 10) = a + 1

Cells(n, 20) = a + 1

Cells(n, 30) = a + 1

a = a + 1

Next n

' VÝBĚR 4 NEJVĚTŠÍCH HODNOT Z CYKLŮ 16 MĚŘENÍ

' OSA X

If polaritax = "Large" **Then** **GoTo** Largex **Else** **GoTo** Smallx

Largex:

```

For n = 22 To konec Step 16
    pocetcisel = Application.Count(Range("C" & n, "C" & n + 15))
    If pocetcisel > 0 Then Cells(n, 5) = Application.Large(Range("C" & n, "C" & n + 15), 1) Else Cells(n, 5) = ""
    If pocetcisel > 1 Then Cells(n + 1, 5) = Application.Large(Range("C" & n, "C" & n + 15), 2) Else Cells(n + 1, 5) = ""
    If pocetcisel > 2 Then Cells(n + 2, 5) = Application.Large(Range("C" & n, "C" & n + 15), 3) Else Cells(n + 2, 5) = ""
    If pocetcisel > 3 Then Cells(n + 3, 5) = Application.Large(Range("C" & n, "C" & n + 15), 4) Else Cells(n + 3, 5) = ""
    If Cells(n, 5) = "" Then Cells(n, 6) = "0" Else Cells(n, 6) = Application.Median(Range("E" & n, "E" & n + 3))
    Cells(n, 7) = Application.Median(Range("A" & n, "A" & n + 15))
    Cells(n, 8) = Cells(n, 6)
    Cells(n, 9) = Cells(n, 7)
Next n

```

GoTo konecx

Smallx:

```

For n = 22 To konec Step 16
    pocetcisel = Application.Count(Range("C" & n, "C" & n + 15))
    If pocetcisel > 0 Then Cells(n, 5) = Application.Small(Range("C" & n, "C" & n + 15), 1) Else Cells(n, 5) = ""
    If pocetcisel > 1 Then Cells(n + 1, 5) = Application.Small(Range("C" & n, "C" & n + 15), 2) Else Cells(n + 1, 5) = ""
    If pocetcisel > 2 Then Cells(n + 2, 5) = Application.Small(Range("C" & n, "C" & n + 15), 3) Else Cells(n + 2, 5) = ""
    If pocetcisel > 3 Then Cells(n + 3, 5) = Application.Small(Range("C" & n, "C" & n + 15), 4) Else Cells(n + 3, 5) = ""
    If Cells(n, 5) = "" Then Cells(n, 6) = "0" Else Cells(n, 6) = Application.Median(Range("E" & n, "E" & n + 3))
    Cells(n, 7) = Application.Median(Range("A" & n, "A" & n + 15))
    Cells(n, 8) = Cells(n, 6)
    Cells(n, 9) = Cells(n, 7)
Next n

```

konecx:

'OSA Y

If polaritay = "Large" **Then GoTo** Largey **Else GoTo** Smally

Largey:

```

For n = 22 To konec Step 16
    pocetcisel = Application.Count(Range("M" & n, "M" & n + 15))
    If pocetcisel > 0 Then Cells(n, 15) = Application.Large(Range("M" & n, "M" & n + 15), 1) Else Cells(n, 15) = ""
    If pocetcisel > 1 Then Cells(n + 1, 15) = Application.Large(Range("M" & n, "M" & n + 15), 2) Else Cells(n + 1, 15) = ""
    If pocetcisel > 2 Then Cells(n + 2, 15) = Application.Large(Range("M" & n, "M" & n + 15), 3) Else Cells(n + 2, 15) = ""
    If pocetcisel > 3 Then Cells(n + 3, 15) = Application.Large(Range("M" & n, "M" & n + 15), 4) Else Cells(n + 3, 15) = ""
    If Cells(n, 15) = "" Then Cells(n, 16) = "0" Else Cells(n, 16) = Application.Median(Range("O" & n, "O" & n + 3))
    Cells(n, 17) = Application.Median(Range("A" & n, "A" & n + 15))
    Cells(n, 18) = Cells(n, 16)
    Cells(n, 19) = Cells(n, 17)
Next n

```

GoTo konecy

Smally:

```

For n = 22 To konec Step 16
    pocetcisel = Application.Count(Range("M" & n, "M" & n + 15))
    If pocetcisel > 0 Then Cells(n, 15) = Application.Small(Range("M" & n, "M" & n + 15), 1) Else Cells(n, 15) = ""
    If pocetcisel > 1 Then Cells(n + 1, 15) = Application.Small(Range("M" & n, "M" & n + 15), 2) Else Cells(n + 1, 15) = ""
    If pocetcisel > 2 Then Cells(n + 2, 15) = Application.Small(Range("M" & n, "M" & n + 15), 3) Else Cells(n + 2, 15) = ""
    If pocetcisel > 3 Then Cells(n + 3, 15) = Application.Small(Range("M" & n, "M" & n + 15), 4) Else Cells(n + 3, 15) = ""
    If Cells(n, 15) = "" Then Cells(n, 16) = "0" Else Cells(n, 16) = Application.Median(Range("O" & n, "O" & n + 3))
    Cells(n, 17) = Application.Median(Range("A" & n, "A" & n + 15))
    Cells(n, 18) = Cells(n, 16)
    Cells(n, 19) = Cells(n, 17)
Next n

```

konecy:

'OSA Z

If polaritaz = "Large" **Then GoTo** Largez **Else GoTo** Smallz

Largez:

```

For n = 22 To konec Step 16
    pocetcisel = Application.Count(Range("W" & n, "W" & n + 15))
    If pocetcisel > 0 Then Cells(n, 25) = Application.Large(Range("W" & n, "W" & n + 15), 1) Else Cells(n, 25) = ""
    If pocetcisel > 1 Then Cells(n + 1, 25) = Application.Large(Range("W" & n, "W" & n + 15), 2) Else Cells(n + 1, 25) = ""
    If pocetcisel > 2 Then Cells(n + 2, 25) = Application.Large(Range("W" & n, "W" & n + 15), 3) Else Cells(n + 2, 25) = ""
    If pocetcisel > 3 Then Cells(n + 3, 25) = Application.Large(Range("W" & n, "W" & n + 15), 4) Else Cells(n + 3, 25) = ""
    If Cells(n, 25) = "" Then Cells(n, 26) = "0" Else Cells(n, 26) = Application.Median(Range("Y" & n, "Y" & n + 3))

```

```
Cells(n, 27) = Application.Median(Range("A" & n, "A" & n + 15))
Cells(n, 28) = Cells(n, 26)
Cells(n, 29) = Cells(n, 27)
```

Next n

GoTo konec

Smallz:

For n = 22 **To** konec **Step** 16

pocetcisel = Application.Count(Range("W" & n, "W" & n + 15))

If pocetcisel > 0 **Then** Cells(n, 25) = Application.Small(Range("W" & n, "W" & n + 15), 1) **Else** Cells(n, 25) = ""

If pocetcisel > 1 **Then** Cells(n + 1, 25) = Application.Small(Range("W" & n, "W" & n + 15), 2) **Else** Cells(n + 1, 25) = ""

If pocetcisel > 2 **Then** Cells(n + 2, 25) = Application.Small(Range("W" & n, "W" & n + 15), 3) **Else** Cells(n + 2, 25) = ""

If pocetcisel > 3 **Then** Cells(n + 3, 25) = Application.Small(Range("W" & n, "W" & n + 15), 4) **Else** Cells(n + 3, 25) = ""

If Cells(n, 25) = "" **Then** Cells(n, 26) = "0" **Else** Cells(n, 26) = Application.Median(Range("Y" & n, "Y" & n + 3))

Cells(n, 27) = Application.Median(Range("A" & n, "A" & n + 15))

Cells(n, 28) = Cells(n, 26)

Cells(n, 29) = Cells(n, 27)

Next n

konec:

' SETŘÍDĚNÍ HODNOT X, Y, Z, VZESTUPNĚ DLE SLOUPCŮ 10, 20, 30

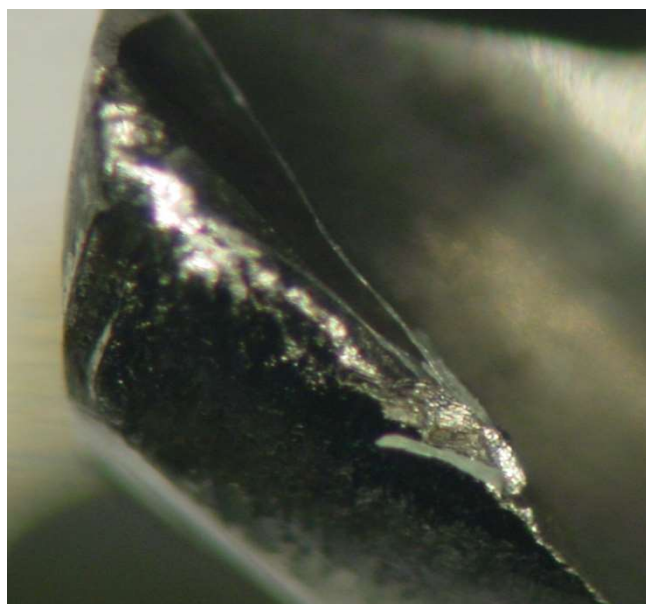
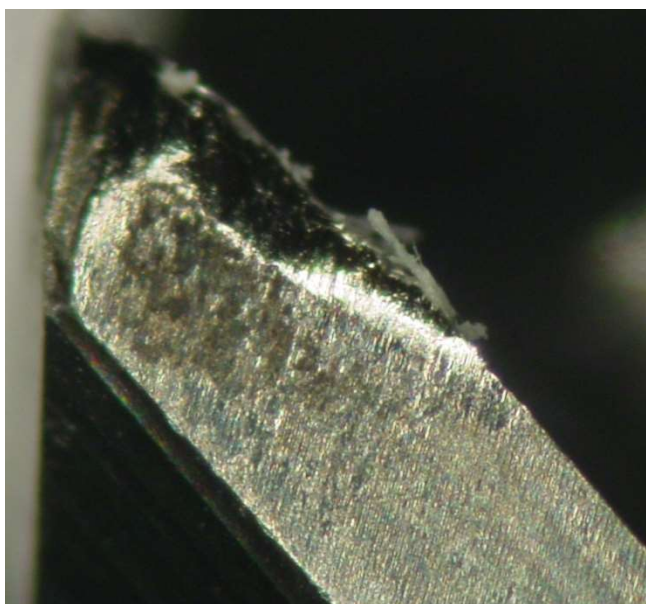
Range("H" & 22, "J" & konec).Sort Key1:=Range("J22"), Order1:=xlAscending

Range("R" & 22, "T" & konec).Sort Key1:=Range("T22"), Order1:=xlAscending

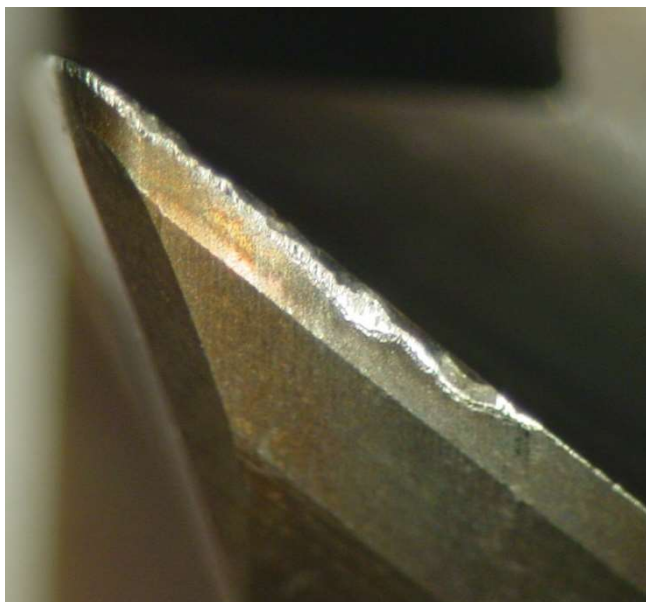
Range("AB" & 22, "AD" & konec).Sort Key1:=Range("AD22"), Order1:=xlAscending

End Sub

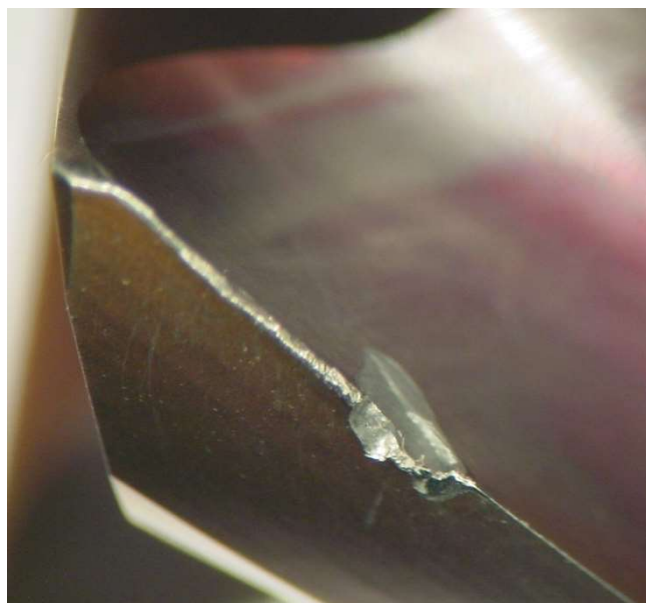
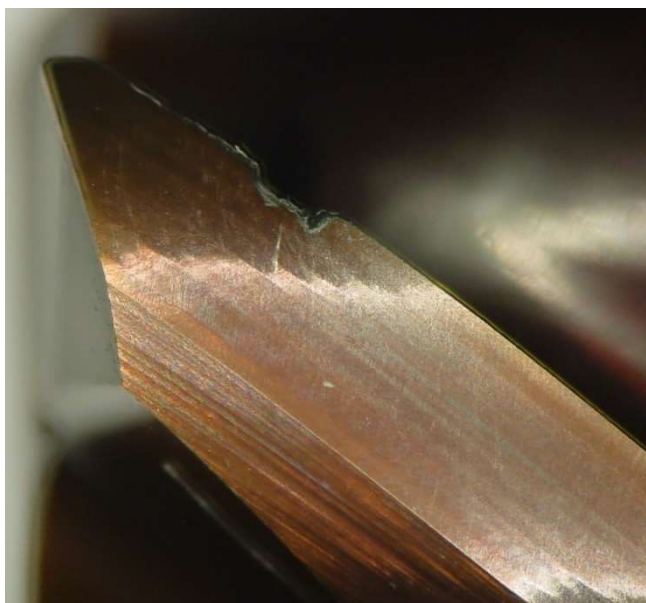
PŘÍLOHA 2



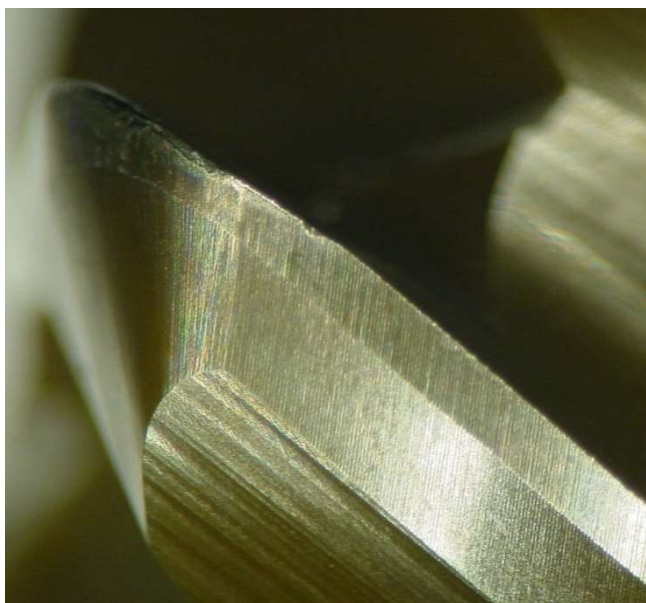
Opotřebení hřbetu (vlevo) a čela (vpravo) nástroje č.1.



Opotřebení hřbetu (vlevo) a čela (vpravo) nástroje č.2.



Opotřebení hřbetu (vlevo) a čela (vpravo) nástroje č.3.



Opotřebení hřbetu (vlevo) a čela (vpravo) nástroje č.4.